



TUGAS AKHIR - SF 141501

**IMPLEMENTASI ALGORITMA REGRESSIVE-
REGRESSIVE PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION PADA INVERSI *VERTICAL
ELECTRICAL SOUNDING* UNTUK
MENCITRAKAN BAWAH PERMUKAAN
TANGGUL ‘LUSI’**

Nanang Firdaus
NRP 1111 100 048

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.
Sungkono, M.Si.

Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - SF 141501

**SUBSURFACE IMAGING OF ‘LUSI’
EMBANKMENT THROUGH VERTICAL
ELECTRICAL SOUNDING INVERSION USING
REGRESSIVE-REGRESSIVE PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION**

Nanang Firdaus
NRP 1111 100 048

Supervisors
Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.
Sungkono, M.Si.

Physics Department
Faculty of Mathematics and Natural Sciences
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

**IMPLEMENTASI ALGORITMA REGRESSIVE-
REGRESSIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION
PADA INVERSI *VERTICAL ELECTRICAL
SOUNDING* UNTUK MENCITRAKAN BAWAH
PERMUKAAN TANGGUL 'LUSI'**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
pada
Bidang Fisika Bumi
Program Studi S-1 Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

NANANG FIRDAUS
NRP. 1111 100 048

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, SU

(.....)

Sungkono, M.Si.

(.....)



**IMPLEMENTASI ALGORITMA REGRESSIVE
REGRESSIVE-PARTICLE SWARM OPTIMIZATION
PADA INVERSI *VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING*
UNTUK MENCITRAKAN BAWAH PERMUKAAN
TANGGUL ‘LUSI’**

Nama : Nanang Firdaus
NRP : 1111 100 048
Jurusan : Fisika
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya S, S.U.
Sungkono, M.Si.

Abstrak

Analisa data geolistrik mampu mendeskripsikan nilai resistivitas bawah permukaan. Nilai resistivitas ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi kejadian fisis di tanggul LUSI melalui pengukuran dan inversi data Vertical Electrical Sounding (VES). Namun demikian, data pengukuran sering kali terkontaminasi noise. Noise pada data akan meningkatkan ketidakpastian solusi model proses inversi. Efek noise pada pengukuran dapat diminimalisir dengan menerapkan metode inversi yang robust terhadap noise, dalam hal ini digunakan algoritma inversi berbasis regressive-regressive Particle Swarm Optimization (RR-PSO). Algoritma RR-PSO diimplementasikan pada data VES di tanggul P.76-P.77, P.79-82 dan P.83-P.84. Hasil inversi data VES lapangan ini menunjukkan nilai resistivitas yang menurun dengan bertambahnya kedalaman. Pada ketiga tanggul yang telah diukur terlihat bahwa keseluruhan tanggul cukup stabil, namun ada beberapa titik tanggul yang mulai tersaturasi air atau terkena rembesan yang bisa mengakibatkan tanggul mengalami collapse (runtuh) dan jebol.

Kata Kunci : Vertical Electrical Sounding (VES), inversi, RR-PSO, tanggul LUSI, rembesan.

**SUBSURFACE IMAGING OF
'LUSI' EMBANKMENT THROUGH VERTICAL
ELECTRICAL SOUNDING INVERSION USING
REGRESSIVE-REGRESSIVE PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION**

Name : Nanang Firdaus
NRP : 1111100048
Department : Physics
Supervisors : Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya S, S.U.
Sungkono, M.Si.

Abstract

Analysis of geoelectric data is able to determine subsurface resistivity values. This resistivity values can be used to identify physical occurrences in the LUSI embankment through field measurements and the data inversion of Vertical Electrical Sounding (VES). However, the measurement data is often contaminated with noise which will increase the uncertainty of model solutions inversion process. The effect of noise on the measurement can be minimized by robust inversion method, in this case used regressive-regressive Particle Swarm optimization (RR-PSO). RR-PSO algorithm is implemented on the VES data which is measured in the LUSI embankment P.76-P.77, P.79-82 and P.83-P.84. The inversion result show that the resistivity values is decreased with increasing depth. The som subsurface resistivity also demonstrates that overall embankment fairly stable, but there are some points of embankment saturated by water or exposed to water seepage that could lead to collapse and broken embankment.

Keywords: *Vertical Electrical Sounding (VES), inversion, RR-PSO, LUSI embankment, seepage.*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil ‘alamiin, puji syukur Penulis ucapkan hanya kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya selama Penulis menjalani perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, sehingga Penulis berhasil menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Implementasi Algoritma Regresive-Regresive Particle Swarm Optimization pada Inversi *Vertical Electrical Sounding* untuk Mencitrakan Bawah Permukaan Tanggul ‘LUSI’”**. Penelitian tugas akhir ini dilakukan, sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan Strata-1 Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dengan terselesaikannya tugas akhir ini, yang tidak lepas dari dukungan dari semua pihak yang telah membantu, Penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. rer. Nat Bagus Jaya Santosa, S.U dan Sungkono, M.Si selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah membagi pengalaman serta memberikan pengarahan dan pengetahuan selama proses penelitian hingga penyusunan laporan.
2. Bapak Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng dan Dr. rer. nat. Eko Minarto, M.Si selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Fisika.
3. Bapak Mashuri, M.Si selaku dosen wali penulis yang selalu memberikan saran-saran dan pengarahan yang baik kepada penulis.
4. Mas Alwi Husein, M.Si beserta seluruh jajaran BPLS atas izin dan bantuannya dalam melaksanakan akuisisi data VES di tanggul LUSI.
5. Seluruh Dosen dan Karyawan serta seluruh Civitas Akademika Jurusan Fisika atas ilmu dan dedikasinya selama ini.

6. Kedua Orang tua tercinta serta seluruh keluarga atas segala do'a, dukungan baik moril, materiil dan pengertiannya yang besar kepada penulis.
7. Ayu Sholah yang tidak henti-hentinya memberikan semangat dan motivasi kepada penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
8. Keluarga besar Laboratorium Fisika Bumi Jurusan Fisika ITS terutama kepada Laboran *multitalent*, Pak Kis beserta pengikutnya sekaligus teman hidup dan perjuangan Mas Yong, Mas Reks, Mas Mufid, Mas Miftah, Mas Thoriq, Jordan, Dharma, Wildan, Kafi, Asdi, Wisnu, Kevin, Adi, Yayan, Aris, Uunk dan yang lainnya serta teman-teman seperjuangan dalam bimbingan tugas akhir. Terimakasih atas hari-harinya selama ini.
9. Segenap teman-teman Fisika Foton 2011 atas kehadirannya dalam hidup penulis sehingga menjadi berwarna.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca guna menyempurnakan laporan ini. Akhir kata penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat dijadikan rujukkan untuk penelitian selanjutnya, memberikan kontribusi dalam bidang geofisika dan memberikan manfaat dan inspirasi bagi pembaca dan semua pihak yang telah membantu.

Surabaya, 27 Juli 2016

Nanang Firdaus

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
COVER PAGE	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kestabilan Tanggul	5
2.2 Sifat Kelistrikan Batuan dan Mineral	6
2.3 Sifat Tahanan Jenis Batuan Berpori	9
2.4 Potensial Listrik oleh Sumber Arus Tunggal di Permukaan	10
2.5 Potensial Sumber Arus Ganda di Permukaan	11
2.6 Konsep Tahanan Jenis Semu (<i>Apparent Resistivity</i>)	14
2.7 Faktor Geometri dan Konfigurasi Elektroda	16
2.8 <i>Vertical Electrical Sounding</i> (VES)	17
2.9 Pemodelan Inversi Geofisika	18
2.10 <i>Regressive-regressive Particle Swarm Optimization</i> (RR-PSO)	19

BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1 Alur Penelitian	25
3.2 Studi Literatur	26
3.3 Akuisisi Data	26
3.4 Pemodelan Ke depan	27
3.5 Inversi Data Lapangan	27
3.6 Analisis	28
3.7 Kesimpulan	28
 BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	 29
4.1 Hasil Akuisisi Data Lapangan	29
4.2 Inversi Data Lapangan VES Menggunakan RR-PSO	31
4.3 Rekontruksi Tanggul dan Interpretasi Hasil Inversi Data VES	35
 BAB V PENUTUP	 41
5.1 Kesimpulan	41
5.2 Saran	41
 DAFTAR PUSTAKA	 43
LAMPIRAN	47
PROFIL PENULIS	65

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Beberapa jenis konfigurasi elektroda dengan faktor geometri dalam metode Geolistrik Tahanan Jenis	17
Tabel 4.1	<i>Search space</i> pada inversi data VES lapangan	31
Tabel 4.2	Hasil inversi data lapangan VES di salah satu titik pengukuran pada tanggul P.76-P.77 menggunakan algoritma RR-PSO	34
Tabel 4.3	Kisaran nilai resistivitas dari beberapa batuan dan mineral	36

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kisaran nilai tahanan jenis beberapa batuan	9
Gambar 2.2	Arus tunggal pada permukaan homogen isotropik	11
Gambar 2.3	Arus arus dan isopotensial	12
Gambar 2.4	Potensial di titik P oleh dua sumber arus	13
Gambar 2.5	Dua elektroda arus dengan dua elektroda potensial pengukuran geolistrik tahanan jenis	13
Gambar 2.6	Tahanan Jenis Semu	15
Gambar 2.7	Efek tahanan jenis medium pada tahanan jenis semu yang terukur	16
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	25
Gambar 3.2	Lintasan Pengukuran	26
Gambar 4.1	Data lapangan VES di salah satu titik pada tanggul P.76-P.77	30
Gambar 4.2	Hasil inversi data lapangan di salah satu titik pada tanggul P.76-P.77: a) <i>Electric Stratigraphy</i> ; b) Pencocokan kurva resistivitas semu pada data VES	32
Gambar 4.3	<i>Misfit Error</i> sebagai fungsi iterasi pada proses inversi data VES	32
Gambar 4.4	Hasil rekonstruksi model bawah permukaan tanggul LUSI P.76-P.77 berdasarkan data resistivitas quasi 2-D	35
Gambar 4.5	Hasil rekonstruksi model bawah permukaan tanggul LUSI P.79-P.82 berdasarkan data resistivitas quasi 2-D	36
Gambar 4.6	Hasil rekonstruksi model bawah permukaan tanggul LUSI P.83-P.84 berdasarkan data resistivitas quasi 2-D	36

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Source Code: Forward Modeling VES	47
Lampiran 2	Source Code: Inversi RR-PSO VES	49
Lampiran 3	Field Data: Tanggul LUSI P.76-P.77	51
Lampiran 4	Field Data: Tanggul LUSI P.79-P.82	55
Lampiran 5	Field Data: Tanggul LUSI P.783-P.84	60

BAB I

PENDAHULUAN

1. 1 Latar Belakang

Metode geolistrik tahanan jenis merupakan metode geofisika eksplorasi yang menghasilkan data yang akurat, efektif dan efisien jika dibandingkan dengan metode eksplorasi yang lain, misalkan metode seismik. Metode ini menggunakan konsep perambatan listrik pada media yang diasumsikan homogen isotropis. Arus yang diinjeksikan ke dalam bumi melalui elektroda dan perbedaan potensial yang terukur akan menggambarkan sebaran nilai tahanan jenis di bawah permukaan bumi. Salah satu metode geolistrik tahanan jenis yang digunakan dalam interpretasi bawah permukaan terhadap kedalaman yaitu *Vertical Electrical Sounding* (VES).

Untuk mendapatkan model resistivitas bawah permukaan dari data VES, perlu analisa data VES melalui proses inversi, yakni mengestimasi nilai resistivitas bawah permukaan melalui proses pencocokan antara data lapangan dan data pengukuran melalui proses optimasi (Kana, 2015). Terdapat dua pendekatan dalam metode optimasi, yaitu: optimasi lokal dan global. Salah satu metode optimum global ialah metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang pertama kali diusulkan oleh Kennedy dan Eberhart (1995).

Metode PSO sendiri telah banyak berkembang sehingga ada beberapa varian dalam metode PSO ini antara lain *Generalized Particle Swarm Optimization* (GPSO) atau *centered-regressive Particle Swarm Optimization* (CR-PSO), *centered-centered Particle Swarm Optimization* (CC-PSO), *centered-progressive Particle Swarm Optimization* (CP-PSO), β -PSO, *progressive-progressive Particle Swarm Optimization* (PP-PSO) dan *regressive-regressive Particle Swarm Optimization* (RR-PSO) (Fernández-Martínez & García-Gonzalo, 2012). Dari semua varian yang telah dikembangkan oleh Martinez, algoritma RR-PSO merupakan algoritma yang baru-baru ini dipublikasikan.

Algoritma RR-PSO memiliki tingkat konvergensi paling tinggi diantaranya varian lainnya (Fernández-Martínez & García-Gonzalo, 2012).

Oleh karena itu baru-baru ini dilakukan penelitian oleh Arung Laby (2016) dengan menguji coba algoritma RR-PSO yang diimplementasikan pada data gelombang Rayleigh dan VES. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma RR-PSO memiliki tingkat kekonvergenan yang tinggi, performa yang cepat, stabil dan *robust* terhadap *noise*, serta solusi model inversi memiliki ketidakpastian yang kecil. Oleh karena itu, dalam penelitian ini interpretasi data VES dilakukan melalui proses inversi menggunakan algoritma RR-PSO.

1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan dalam penelitian ini yaitu bagaimana hasil interpretasi bawah permukaan tanggul menggunakan algoritma RR-PSO pada data *Vertical Electrical Sounding* (VES).

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan permasalahan di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan interpretasi bawah permukaan tanggul menggunakan algoritma RR-PSO pada data *Vertical Electrical Sounding* (VES).

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian tugas akhir ini diberikan batasan masalah sebagai berikut.

1. Metode optimasi dalam proses inversi yang digunakan adalah algoritma *regresive – regresive Particle Swarm Optimization* (RR-PSO).
2. Data yang digunakan untuk interpretasi hasil inversi merupakan data *Vertical Electrical Sounding* (VES) di tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI) Jawa Timur titik P76-P77, P78-P79 dan P79-P82.

3. *Software* yang digunakan ialah MATLAB R2009a.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat utama dari penelitian ini adalah memberi gagasan dan pengembangan dalam bidang komputasi dan geofisika dalam menginterpretasi bawah permukaan dengan metode optimasi yang cukup akurat.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam buku penelitian tugas akhir ini secara garis besar sebagai berikut.

- **BAB I PENDAHULUAN**
Bab ini berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian serta sistematika penulisan.
- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**
Bab ini berisi teori dan konsep-konsep dasar yang digunakan sebagai landasan dalam penelitian tugas akhir.
- **BAB III METODE PENELITIAN**
Bab ini menjelaskan prosedur kerja dan algoritma yang digunakan dalam penelitian tugas akhir.
- **BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**
Bab yang merupakan inti dari tugas akhir ini berisi hasil penampang bawah permukaan tanggul LUSI pada titik 76-77, 78-79 dan 79-81 dari hasil inversi data *Vertical Electrical Sounding* (VES) menggunakan algoritma RR-PSO.

- **BAB V PENUTUP**

Bab ini memaparkan kesimpulan yang diperoleh dari penelitian tugas akhir dan saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kestabilan Tanggul

Tanggul merupakan suatu bidang pada permukaan tanah yang tidak horizontal dan membentuk sudut terhadap luasan tertentu dengan komponen gravitasi cenderung menggerakkan tanah ke bawah. Saat komponen gaya gravitasi lebih besar dari gaya geser bidang tanah maka akan terjadi longsor.

Menurut Fell *et al.*, (2005), tanggul dibedakan menjadi dua macam yaitu *Earth Fill* dan *Rock Fill*. *Earth Fill* merupakan tanggul yang terbentuk dengan komposisi material yang dipadatkan yang ada di daerah tersebut. Sedangkan *Rock Fill* dibentuk dari material yang bukan hanya dari daerah tersebut saja melainkan dibuat dari material lain juga dalam bentuk beton. Sedangkan berdasarkan terbentuknya, tanggul dibedakan menjadi tiga macam yaitu tanggul alami, buatan dan komposit (Fell *et al.*, 2005). Tanggul LUSI merupakan tanggul buatan dengan komposisi alami yang dipadatkan (*Earth Fill*). Setiap macam tanggul, kemungkinan terjadinya retakan akibat erosi air selalu ada, sehingga runtuhnya tanggul dapat menimbulkan bencana bagi manusia. Oleh karena itu perlu dilakukan penilaian tingkat kestabilan tanggul tersebut untuk mengetahui apakah tanggul tersebut akan runtuh atau mengalami keretakan?. Kestabilan tanggul dipengaruhi oleh gaya-gaya yang bekerja pada tanggul tersebut, yaitu gaya penggerak dan gaya penahan. Perbandingan antara gaya penggerak dan gaya penahan merupakan parameter dalam menentukan faktor keamanan (F_s) suatu tanggul. Jika nilai $F_s > 1$, maka tanggul tersebut dianggap bagus. Jika $F_s = 1$, tanggul dalam keadaan seimbang dan siap untuk longsor, sedangkan jika $F_s < 1$ maka tanggul dianggap tidak bagus.

Faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan tanggul antara lain: pelapukan, deformasi atau pergeseran posisi tanah, reposisi, getaran, retakan, rembesan atau saturasi fluida dan aktivitas seismik. Pelapukan dan erosi sangat dipengaruhi oleh iklim yang

diwakili oleh kehadiran hujan di daerah setempat, curah hujan kadar air dan kejenuhan air. Pada beberapa kasus longsor, hujan sering menjadi pemicu karena hujan meningkatkan kadar air tanah yang menyebabkan kondisi fisik/mechanik material tubuh tanggul berubah. Kenaikan kadar air akan memperlemah sifat fisik-mekanik tanah dan menurunkan faktor keamanan tanggul (Brunsden & Prior, 1984). Tekanan fluida dari dalam tanggul yang memaksa fluida masuk ke pori-pori tanggul juga mempengaruhi kadar air di dalam tanggul sehingga tanggul tersaturasi fluida. Berbagai faktor dari dalam dan luar tanggul mengakibatkan batuan dalam tanggul mengalami perubahan bentuk, posisi dan volume atau mengalami deformasi. Deformasi pada batuan dapat digolongkan menjadi tiga macam perubahan yaitu kekar (retakan/rekahan), lipatan dan patahan. Retakan atau rekahan terbentuk akibat suatu gaya yang bekerja pada batuan tersebut dan belum mengalami perubahan, biasanya terisi mineral lain. Lipatan terjadi akibat gaya tegasan sehingga batuan bergerak dari kedudukan semula membentuk lengkungan. Sedangkan patahan merupakan struktur retakan yang telah mengalami pergeseran (Husain, 2012).

2.2 Sifat Kelistrikan Batuan dan Mineral

Aliran arus listrik di dalam batuan dan mineral dapat digolongkan menjadi tiga macam, yaitu konduksi secara elektronik, konduksi secara elektrolitik dan konduksi secara dielektrik.

a. Konduksi secara elektronik

Konduksi ini terjadi jika batuan atau mineral mempunyai banyak elektron bebas sehingga arus listrik dialirkan dalam batuan atau mineral oleh elektron-elektron bebas tersebut. Aliran listrik ini juga dipengaruhi oleh sifat atau karakteristik masing-masing batuan yang dilewatinya. Salah satu sifat atau karakteristik batuan tersebut adalah resistivitas (tahanan jenis) yang menunjukkan kemampuan bahan tersebut untuk

menghantarkan arus listrik. Semakin besar nilai resistivitas suatu bahan maka semakin sulit bahan tersebut menghantarkan arus listrik, begitu pula sebaliknya. Resistivitas memiliki pengertian yang berbeda dengan resistansi (hambatan), dimana resistansi tidak hanya bergantung pada bahan tetapi juga bergantung pada faktor geometri atau bentuk bahan tersebut, sedangkan resistivitas tidak bergantung pada faktor geometri.

b. Konduksi secara elektrolitik

Sebagian besar batuan merupakan konduktor yang buruk dan memiliki resistivitas yang sangat tinggi. Namun pada kenyataannya batuan biasanya bersifat porus dan memiliki pori-pori yang terisi oleh fluida, terutama air. Akibatnya batuan-batuan tersebut menjadi konduktor elektrolitik, dimana konduksi arus listrik dibawa oleh ion-ion elektrolitik dalam air. Konduktivitas dan resistivitas batuan porus bergantung pada volume dan susunan pori-porinya. Konduktivitas akan semakin besar jika kandungan air dalam batuan bertambah banyak dan sebaliknya resistivitas akan semakin besar jika kandungan air dalam batuan berkurang.

c. Konduksi secara dielektrik

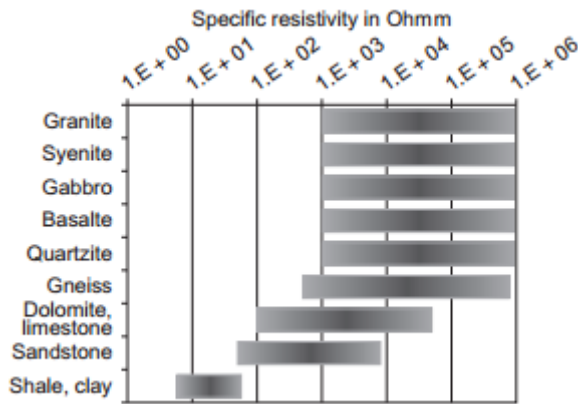
Konduksi ini terjadi jika batuan atau mineral bersifat dielektrik terhadap aliran arus listrik, artinya batuan atau mineral tersebut mempunyai elektron bebas sedikit, bahkan tidak sama sekali. Elektron dalam batuan berpindah dan berkumpul terpisah dalam inti karena adanya pengaruh medan listrik di luar, sehingga terjadi polarisasi (Reynolds, 2011).

Dari semua sifat fisika batuan dan mineral, resistivitas memperlihatkan variasi harga yang sangat banyak. Pada mineral-mineral logam, harganya $10^{-8} \Omega\text{m}$ hingga $10^7 \Omega\text{m}$. Begitu juga

pada batuan-batuan lain, berkisar pada dengan komposisi yang bermacam-macam akan menghasilkan *range* resistivitas yang bervariasi pula. Sehingga range resistivitas maksimum yang mungkin adalah dari $1,6 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ (perak asli) hingga $10^{16} \Omega\text{m}$ (belerang murni).

Konduktor biasanya didefinisikan sebagai bahan yang memiliki resistivitas kurang dari $10^{-8} \Omega\text{m}$, sedangkan isolator memiliki resistivitas lebih dari $10^7 \Omega\text{m}$. Dan di antara keduanya adalah bahan semikonduktor. Di dalam konduktor berisi banyak elektron bebas dengan mobilitas yang sangat tinggi. Sedangkan pada semikonduktor, jumlah elektron bebasnya lebih sedikit. Isolator dicirikan oleh ikatan ionik sehingga elektron-elektron valensi tidak bebas bergerak.

Kebanyakan mineral membentuk batuan penghantar listrik yang tidak baik walaupun beberapa logam asli dan grafit menghantarkan listrik. Resistivitas yang terukur pada material bumi utamanya ditentukan oleh pergerakan ion-ion bermuatan dalam pori-pori fluida. Air tanah secara umum berisi campuran terlarut yang dapat menambah kemampuannya untuk menghantar listrik, meskipun air tanah bukan konduktor listrik yang baik. Variasi resistivitas material bumi ditunjukkan sebagaimana pada Gambar (2.1).



Gambar 2.1 Kisaran nilai tahanan jenis beberapa batuan (Schön, 2011)

Harga tahanan jenis batuan tergantung macam-macam materialnya, densitas, porositas, ukuran dan bentuk pori-pori batuan, kandungan air, kualitas dan suhu, dengan demikian tidak ada kepastian harga tahanan. Jenis untuk setiap macam batuan pada akuifer yang terdiri atas material lepas mempunyai harga tahanan jenis yang berkurang apabila makin besar kandungan air tanahnya atau makin besar kandungan garamnya (misal air asin). Mineral lempung bersifat menghantarkan arus listrik sehingga harga tahanan jenis akan kecil.

2.3 Sifat Tahanan Jenis Batuan Berpori

Tahanan jenis pada batuan yang terukur merupakan tahanan listrik gabungan (tahanan listrik pengganti) antara tahanan listrik matriks dan tahanan listrik fluida pada batuan berpori. Hubungan antara tahanan listrik dengan porositas batuan pada batuan sedimen (pasir dan batuan gamping berpori, lempung) pertama kali diusulkan oleh Archie (1942). Archie (1942) menunjukkan tahanan jenis batuan (ρ_o) yang terisi oleh air asin berbanding lurus dengan tahanan jenis air asin (ρ_w) yang mengisi pori dimana tahanan jenis matriks direfleksikan oleh faktor formasi (F).

Archie mengusulkan dua persamaan empiris, yaitu: Persamaan Archie I dan II.

Persamaan Archie I, persamaan empiris yang menyangkut hubungan antara tahanan jenis batuan dengan porositas batuan yang terisi penuh oleh air pori adalah sebagai berikut: $\rho_b = a\phi^{-m} \rho_w$ (2.1)

dengan ρ_b merupakan tahanan jenis batuan yang terukur (Ωm) (dari permukaan, lubang bor dll), ρ_w adalah tahanan jenis air pengisi pori yang diukur dari air formasi ataupun dihitung (Ωm), a adalah konstanta yang mencirikan jenis, karakter batuan (tekstur bentuk dll), m adalah konstanta yang mencirikan karakter sementasi dan Φ adalah porositas batuan (%).

Persamaan Archie II yang ditulis dalam Persamaan (2.2), menyangkut porositas batuan yang porinya tidak jenuh air dimana dinyatakan sebagai berikut: $\rho_t = a\phi^{-m} S_w^{-n} \rho_w$ (2.2) dengan ρ_t adalah tahanan jenis batuan bila tidak jenuh terisi air (Ωm), ρ_b adalah tahanan jenis batuan bila jenuh terisi air formasi (Ωm) dan n yang merupakan faktor kejenuhan air (Taib, 1999).

2.4 Potensial Listrik oleh Sumber Arus Tunggal di Permukaan

Bila arus tunggal I diinjeksikan ke dalam bumi yang homogen dan isotropik dengan konduktivitas σ ($1/\rho$) dan permukaan yang dilalui arus I merupakan ruang setengah bola ($2\pi r^2$) seperti pada Gambar (2.2), maka potensial V di suatu titik yang berjarak r dari sumber arus tunggal adalah:

$$\frac{\delta V}{\delta r} = \rho J \quad (2.3)$$

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.4)$$

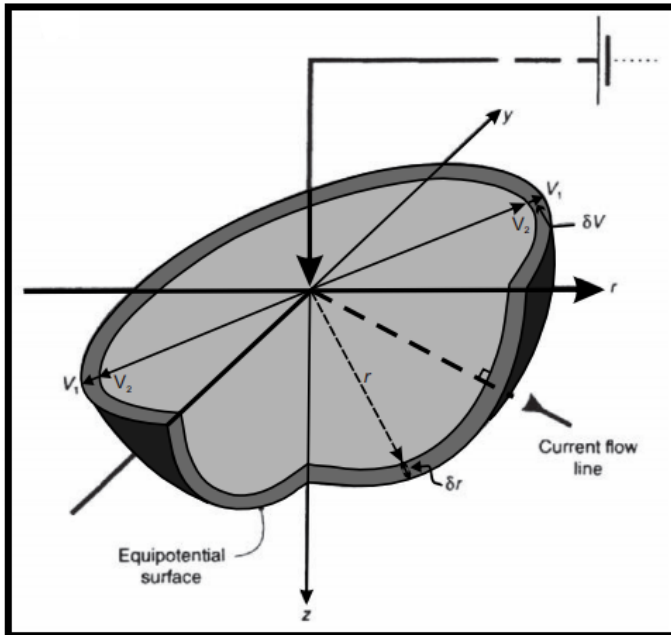
Maka besar V pada jarak r adalah:

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (2.5)$$

atau

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad (2.6)$$

dengan V merupakan potensial arus listrik (V), I adalah arus listrik (A), ρ adalah tahanan jenis batuan (Ωm), r merupakan jarak antara satu titik dengan sumber (m) dan J didefinisikan sebagai *current* potensial (A/m^2).



Gambar 2.2. Arus tunggal pada permukaan Homogen Isotropik (Reynolds, 2011)

2.5 Potensial Sumber Arus Ganda di Permukaan

Pada persamaan sumber arus tunggal sebelumnya dapat dijabarkan untuk dua elektroda yang ditempatkan di permukaan bumi dengan jarak antara dua elektroda yang berhingga. Sehingga potensial pada titik-titik di permukaan dipengaruhi oleh kedua elektroda arus tersebut. pengukuran beda potensial antara dua titik elektroda potensial akibat suatu titik P merupakan

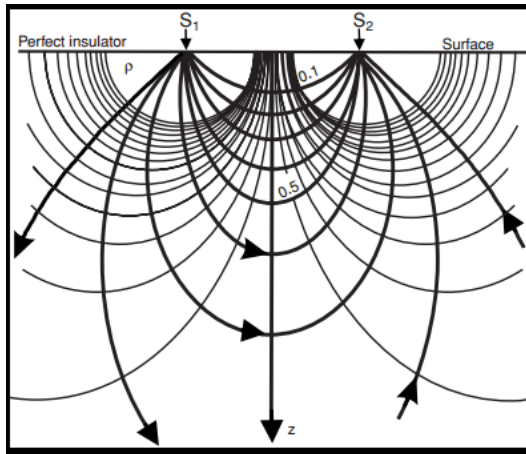
superposisi atau penjumlahan potensial akibat kedua elektroda arus, sehingga persamaan potensialnya dapat ditulis:

$$V_1 = \frac{I\rho}{2\pi r_1} \quad V = \frac{I\rho}{2\pi r_2} \quad (2.7)$$

Potensial di titik P (superposisi dari V_1 dan V_2):

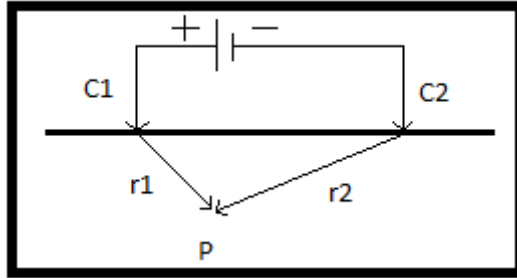
$$V_P = V_1 - V_2 = \frac{i\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.8)$$

dengan r_1 dinyatakan sebagai jarak titik P dengan elektroda arus + (C1) dan r_2 merupakan jarak titik P dengan elektroda arus - (C2)



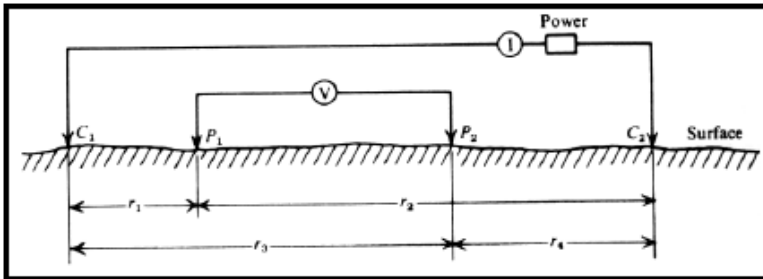
Gambar 2.3. Arah arus dan isopotensial (Reynolds, 2011)

Pada Gambar (2.3) menunjukkan bahwa arah penjalaran arus pada dua titik yang saling berhubungan (S_1 dan S_2), sedangkan garis isopotensial merupakan garis yang membentuk lingkaran di sekitar titik S_1 dan S_2 (Nostrand & Cook, 1966).



Gambar 2.4. Potensial di titik P oleh dua sumber arus

Dengan menambahkan satu elektroda potensial dapat diukur beda potensial antara dua elektroda arus tersebut seperti pada Gambar (2.4) dengan titik C1 dan C2 sebagai elektroda arus dan titik P merupakan beda potensial yang terukur.



Gambar 2.5. Dua elektroda arus dengan dua elektroda potensial pengukuran geolistrik tahanan jenis

dengan menerapkan Persamaan (2.7) dapat dihitung potensial di elektroda P1 dan P2 oleh kedua elektroda arus C1 dan C2, sehingga beda potensial dari V_{P1} dan V_{P2} , yaitu:

$$\Delta V = \frac{i\rho}{2\pi} \left(\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right) \quad (2.9)$$

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left(\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right) \quad (2.10)$$

Faktor Geometri (K) didefinisikan sebagai:

$$K = 2\pi \left(\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right) \quad (2.11)$$

dengan ΔV merupakan beda potensial antara elektroda potensial P1 dan P2 (V) sedangkan I merupakan kuat arus (A). Untuk ρ adalah resistivitas (Ωm) dengan r_1, r_1, r_1, r_1 sebagai jarak antara C1-P1, P1-C2, C1-P2, P2-C2. Susunan seperti ini berkaitan dengan empat elektroda yang terbentang secara normal yang digunakan dalam eksplorasi geofisika dengan metode geolistrik tahanan jenis (Reynolds, 2011). Persamaan (2.11) berbeda untuk masing-masing konfigurasi yang dijelaskan pada subbab berikutnya.

2.6 Konsep Tahanan Jenis Semu (*Apparent Resistivity*)

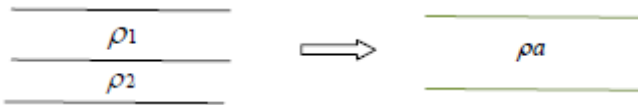
Dengan mengetahui arus yang diinjeksikan dan mengukur beda potensial di sekitar tempat arus diinjeksikan, maka nilai tahanan jenis tanah dapat diperoleh. Nilai tahanan jenis yang diperoleh dari hasil pengukuran disebut sebagai *apparent resistivity* atau resistivitas semu. Metode ini mengasumsikan bahwa bumi mempunyai sifat homogen isotropis. Dalam kondisi yang sesungguhnya, tanah bersifat tidak homogen karena bumi terdiri atas lapisan-lapisan dengan resistivitas (ρ) yang berbeda beda, sehingga nilai resistivitas yang kita peroleh merupakan nilai resistivitas yang mewakili nilai resistivitas seluruh lapisan yang terlalui oleh garis ekipotensial. Ketika garis ekipotensial hanya melewati lapisan pertama, maka nilai resistivitas yang diperoleh merupakan nilai resistivitas dari lapisan itu sendiri. namun ketika garis ekipotensial melewati lapisan pertama dan kedua, maka nilai resistivitas yang diperoleh merupakan nilai resistivitas gabungan antara lapisan pertama dan lapisan kedua, begitu juga dengan ekipotensial yang melewati lapisan pertama, kedua dan seterusnya nilai resistivitas yang diperoleh merupakan nilai resistivitas gabungan oleh lapisan-lapisan tersebut seperti pada

Gambar 2.7. Adanya perbedaan nilai tahanan jenis terukur dengan nilai tahanan jenis teoritis disebut anomali. Selanjutnya anomali ini yang akan membantu dalam interpretasi tahanan jenis dan keberadaan anomali itu.

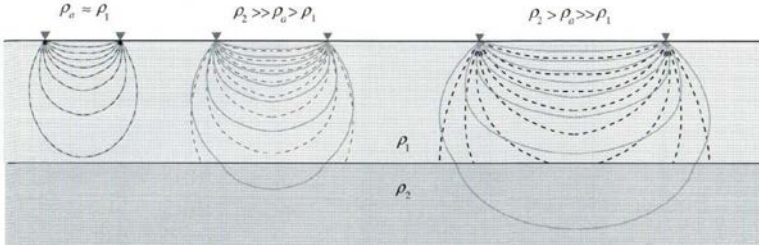
Tahanan jenis semu adalah hasil pengukuran tahanan jenis yang merupakan tahanan jenis ‘pengganti’ dari keadaan variasi tahanan jenis yang sebenarnya yang terdapat di bawah susunan elektroda. Tahanan jenis semu (ρ_a) merupakan tahanan jenis pengganti bukan tahanan jenis sebenarnya material, akan tetapi tahanan jenis pengganti dari semua anomali bawah permukaan yang ada sehingga resistivitas semu (ρ_a) merupakan subjek dari interpretasi yang terlihat pada Gambar (2.6) (Taib, 1999). Untuk mendapatkan nilai dari resistivitas semu (ρ_a) dapat digunakan rumus dari Persamaan (2.10), sehingga Persamaan (2.12) bisa dituliskan sebagai berikut:

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left(\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right) \quad (2.12)$$

atau dengan kata lain tahanan jenis semu adalah tahanan jenis dari suatu medium fiktif homogen yang ekuivalen dengan medium berlapis yang kita tinjau.



Gambar 2.6. Tahanan Jenis Semu



Gambar 2.7. Efek tahanan jenis medium pada tahanan jenis semu yang terukur (Burger, 1992)

Gambar (2.7) menunjukkan bahwa ketika jarak antar elektroda arus semakin jauh maka garis ekuipotensial semakin besar dan ke dalam. Namun ketika garis ekuipotensial melewati medium yang berbeda terlihat adanya pembelokan pada garis ekuipotensial.

2.7 Faktor Geometri dan Konfigurasi Elektroda

Pada metode Eksplorasi Tahanan Jenis ada beberapa konfigurasi elektroda atau susunan elektroda potensial dan arus yang digunakan. Perbedaan letak elektroda potensial (M-N) dan elektroda arus (A-B) akan mempengaruhi besar medan listrik yang diukur. Besar faktor oleh perbedaan akibat letak titik pengamatan disebut Faktor Geometri (K).

$$K = 2\pi \left(\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right)^{-1} \quad (2.13)$$

Masing-masing aturan atau konfigurasi elektroda memiliki nilai yang tetap. Berikut gambar yang memperlihatkan beberapa konfigurasi elektroda dari beberapa metode tahanan jenis (Reynolds, 1995). Persamaan (2.13) merupakan persamaan umum dari faktor geometri, untuk setiap konfigurasi mempunyai nilai r (jarak) yang berbeda-beda.

Tabel 2.1. Beberapa jenis konfigurasi elektroda dengan faktor geometri dalam metode Geolistrik Tahanan Jenis

No.	Konfigurasi Elektroda	Faktor Geometri (K)
1.	Wenner	$2\pi a$
2.	Schlumberger	$\pi(L^2 - 1^2) / 2$
3.	Dipol – Dipol	$n(n+1)(n+2)\pi a$
4.	Pole – Pole	$2\pi a$

C1 dan C2 adalah elektroda-elektroda arus, P1 dan P2 adalah elektroda-elektroda potensial, a merupakan spasi elektroda, n adalah perbandingan jarak antara elektroda–elektroda C1 dan P1 dengan spasi a , L adalah bentangan maksimum.

2.8 Vertical Electrical Sounding (VES)

Metode resistivitas sounding yang dikenal juga sebagai VES merupakan metode yang mempelajari variasi resistivitas batuan di bawah permukaan bumi secara vertikal. Pada metode ini pengukuran titik sounding dilakukan dengan cara mengubah-ubah jarak elektroda, dimulai jarak elektroda yang kecil kemudian membesar secara gradual. Jarak elektroda ini sebanding dengan kedalaman lapisan batuan yang terdeteksi. Semakin dalam lapisan batuan, maka semakin besar pula jarak elektroda (Lowrie, 2007). Dengan menggunakan konsep arus yang telah dijelaskan sebelumnya maka dapat diperoleh nilai resistivitas semu pada setiap titik pengukuran (sounding) seperti pada Persamaan (2.14) berikut:

$$\rho_a = \frac{\frac{\pi V}{4I}(L^2 - a^2)}{a} \quad (2.14)$$

pada Persamaan (2.14) yaitu nilai resistivitas semu, didapatkan hubungan dengan ketebalan lapisan yang dinyatakan dalam persamaan integral Hankel.

$$\rho_{as} = s^2 \int_0^\infty T(\lambda) J_1(\lambda s) \lambda d\lambda \quad (2.15)$$

dengan

$$T_i = \frac{T_{i+1}(\lambda) + \rho_i \tanh(\lambda h_i)}{[1 + \frac{T_{i+1}(\lambda) \tanh(\lambda h_i)}{\rho_i}]} \quad i = n-1, \dots, 1 \quad (2.16)$$

dengan s adalah setengah dari jarak elektroda arus ($AB/2$ untuk konfigurasi Schlumberger). T merupakan fungsi transformasi resistivitas dan J mendefinisikan fungsi Bessel orde pertama (Koefoed & Mallick, 1979). Namun pada fungsi transformasi resistivitas tersebut cukup rumit dan memakan waktu lama, sehingga Ghosh (1971) menyederhanakan persamaan tersebut dengan mengaplikasikan filter linier sehingga lebih cepat.

$$\rho_a = \sum_k T_k(\lambda) f_k \quad (2.17)$$

dengan f_k merupakan koefisien filter yang diturunkan oleh Ghosh (1971). Sehingga Persamaan (2.17) digunakan sebagai fungsi pemodelan ke depan pada VES yang menyatakan resistivitas semu sebagai fungsi dari resistivitas terhadap ketebalan tiap lapisan.

2.9 Pemodelan Inversi Geofisika

Dalam geofisika, ada dua jenis pemodelan yang digunakan yaitu pemodelan ke depan dan pemodelan inversi. Pemodelan ke depan menyatakan proses perhitungan data yang secara teoritis akan teramati di permukaan bumi jika diketahui nilai parameter model bawah permukaan tertentu. Sedangkan pemodelan inversi merupakan kebalikan dari pemodelan ke depan dengan parameter model diperoleh secara langsung dari data lapangan. Model dan parameter model digunakan untuk mengkarakterisasi suatu kondisi geologi bawah permukaan. Pemodelan data dilakukan dengan mencari suatu model yang menghasilkan respons yang cocok atau *fit* dengan data pengamatan atau data lapangan.

Dengan demikian, model tersebut dapat dianggap mewakili kondisi bawah permukaan di tempat pengukuran data (Grandis, 2009).

Menurut Grandis (2009), dalam proses inversi kesesuaian antara respons model dengan data pengamatan umumnya dinyatakan oleh suatu fungsi obyektif yang harus diminimumkan. Pemodelan inversi hanya dapat dilakukan jika hubungan antara data dan parameter model (fungsi pemodelan ke depan) telah diketahui. Untuk mendapatkan solusi yang optimum maka fungsi tersebut harus dioptimasi. Umumnya metode optimasi lokal memiliki kelemahan mudah terjebak pada minimum lokal seperti pada fungsi obyektif kurva VES, sehingga diperlukan metode optimasi global yang dapat mencapai solusi optimum pada minimum global. Salah satu metode optimasi yang banyak digunakan pada permasalahan inversi geofisika yaitu *Particle Swarm Optimization* (PSO).

2.10 Regressive-regressive Particle Swarm Optimization (RR-PSO)

Particle Swarm Optimization didasarkan pada perilaku sebuah kawanan serangga. Algoritma ini meniru perilaku sosial dari organisme ini. Perilaku sosial terdiri dari tindakan individu dan pengaruh dari individu-individu lain dalam suatu kelompok. Kata partikel menunjukkan seekor burung dalam kawanan burung misalnya dan setiap individu atau partikel berperilaku secara terdistribusi dengan menggunakan kecerdasannya sendiri dan juga dipengaruhi perilaku kelompok kolektifnya. Dengan demikian jika satu partikel atau seekor burung menemukan jalan yang tepat atau cepat menuju ke sumber makanan, sisa kelompok yang lain juga akan dapat segera mengikuti jalan tersebut meskipun lokasi mereka jauh di kelompok tersebut (Santosa, 2006).

Metode PSO ini disebut sebagai alternatif dari algoritma genetika atau sering disebut *evolution-based procedures*. Algoritma PSO ini awalnya diusulkan oleh Kennedy dan

Eberhart (1995). Dalam konteks optimasi multivariabel, kawanan diasumsikan mempunyai ukuran tertentu atau tetap dengan setiap partikel posisi awalnya terletak di suatu lokasi yang acak dalam ruang multidimensi. Setiap partikel diasumsikan memiliki dua karakteristik yaitu posisi dan kecepatan. Setiap partikel bergerak dalam ruang atau *space* tertentu dan mengingat posisi terbaik yang pernah dilalui atau ditemukan terhadap sumber makanan atau nilai fungsi objektif. Setiap partikel menyampaikan informasi atau posisi terbaiknya kepada partikel yang lain dan menyesuaikan posisi dan kecepatan masing-masing berdasarkan informasi yang diterima mengenai posisi terbaik tersebut. Model ini akan disimulasikan dalam ruang dengan dimensi tertentu dengan iterasi sehingga di setiap iterasi posisi partikel akan semakin mengarah ke target yang dituju (minimasi atau maksimal fungsi). Ini dilakukan hingga maksimum iterasi dicapai.

Algoritma PSO sangat sederhana dan mudah diterapkan untuk mengoptimasi permasalahan-permasalahan yang ada pada inversi data. Berikut merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam algoritma PSO.

1. Menentukan dimensi dari jumlah partikel.
2. Membangkitkan populasi awal X secara random kemudian mengevaluasi nilai fungsi tujuan.
3. Menentukan kecepatan dari semua partikel dengan asumsi kecepatan awal sama dengan nol.
4. Menentukan nilai terbaik dari posisi X (P_{best}) dan nilai terbaik dari semua partikel (G_{best}).
5. Menghitung nilai dari kecepatan partikel dan posisi partikel ke- i dengan persamaan berikut:

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^{k+1} + \phi_1 \cdot 1. (g^k - X_i^k) + \phi_2 \cdot 1. (l_i^k - X_i^k)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \cdot 1$$

(2.14)

dengan

$$\phi_1 = r_1 a_g, \phi_2 = r_2 a_l, r_1, r_2 \rightarrow U(0,1) w, a_l, a_g \in \mathbb{R} \quad (2.15)$$

Dalam perkembangannya, PSO telah berevolusi menjadi beberapa varian. Dalam PSO setiap partikel dapat diibaratkan sebagai sebuah massa pada dua pegas yang masing-masing memiliki posisi setimbang l_i^k dan g^k , dengan konstanta pegas dan faktor redaman yang berhubungan dengan inersia dan akselerasi. Hal ini dapat disimpulkan bahwa algoritma PSO dapat dijelaskan melalui sistem getaran teredam. Ide tersebut pertama kali dikemukakan oleh Brandstatter dan Baumgartner (2002) yang kemudian disempurnakan oleh Fernandez-Martinez (2008) dengan menurunkan persamaan diferensial dari getaran teredam,

$$\begin{aligned} X''(t) + (1 - \omega) X'(t) + \phi X(t) &= \phi_1 g(t) + \phi_2 l(t), t \in \mathbb{R} \\ X(0) &= X_0 \\ X'(0) &= V_0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

dimana persamaan tersebut dapat didekati menggunakan *finite difference* sehingga oleh Martinez dan Gonzalo (2008) digunakan skema diskrit *backward finite difference* untuk mencari solusi kecepatan dan *center difference* untuk mencari solusi akselerasi. Dengan mensubstitusikan hasil dari solusi kecepatan dan akselerasi ke Persamaan (2.16) maka didapatkan persamaan posisi dan kecepatan yang absolut ($X(t)$, $V(t)$). Hasil dari persamaan posisi dan kecepatan absolut yang didapatkan tersebut merupakan versi pertama dari PSO yaitu yang biasa disebut juga *Generalized Particle Swarm Optimization* (GPSO) atau *centered-regressive Particle Swarm Optimization* (CR-PSO). GPSO merupakan pintu pertama bagi varian PSO yang lain, diantaranya *centered-centered Particle Swarm Optimization* (CC-PSO), *centered-progressive Particle Swarm Optimization* (CP-PSO), β -PSO, *progressive-progressive Particle Swarm Optimization* (PP-

PSO) dan *regressive-regressive Particle Swarm Optimization* (RR-PSO) (Fernández Martínez & García Gonzalo, 2008).

Dalam RR-PSO digunakan skema diskrit *backward difference* dalam mencari solusi kecepatan dan akselerasi pada getaran teredam, sehingga dinamakan *regressive-regressive Particel Swarm Optimization*. Berikut merupakan algoritma RR-PSO dari solusi kecepatan dan akselerasinya.

$$\begin{aligned}
 X'(t) &\approx \frac{X(t) - X(t - \Delta t)}{\Delta t} \\
 X''(t) &\approx \frac{X(t) - 2X(t - \Delta t) + X(t - 2\Delta t)}{\Delta t^2} \\
 &= \frac{X'(t) - X'(t - \Delta t)}{\Delta t} \tag{2.17}
 \end{aligned}$$

kemudian disubstitusi ke Persamaan (2.15), dengan menerapkan hubungan

$$X(t) = X(t - \Delta t) + V(t)\Delta t ,$$

$$\begin{aligned}
 &\frac{V(t) - V(t - \Delta t)}{\Delta t} + (1 - \omega)V(t) + \phi(X(t - \Delta t)) + V(t)\Delta t \\
 &= \phi_1 g(t - t_0) + \phi_2 l(t - t_0) \tag{2.18}
 \end{aligned}$$

$$V(t) = \frac{V(t - \Delta t) + \phi_1 \Delta t (g(t - t_0) - X(t - \Delta t))}{1 + (1 - \omega)\Delta t + \phi \Delta t^2} + \frac{\phi_2 \Delta t (l(t - t_0) - X(t - \Delta t))}{1 + (1 - \omega)\Delta t + \phi \Delta t^2} \tag{2.19}$$

sehingga algoritma RR-PSO dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V(t + \Delta t) = \frac{V(t) + \phi_1 \Delta t (g(t) - X(t)) + \phi_2 \Delta t (l(t) - X(t))}{1 + (1 - \omega) \Delta t + \phi \Delta t^2},$$

$$X(t + \Delta t) = X(t) + V(t + \Delta t) \Delta t \quad (2.20)$$

dengan $\phi = \phi_1 + \phi_2$ dan $\Delta t = 1$. ϕ, ω merupakan parameter dari RR-PSO yang harus dimasukkan dalam persamaan. Untuk penentuan parameter tersebut, Fernández-Martínez & García-Gonzalo (2012) mengusulkan nilai yang baik untuk digunakan dalam persamaan melalui penelitian mereka dengan mencoba-coba nilai yang menghasilkan *misfit error* yang paling kecil. Nilai *error* tersebut merupakan yang paling kecil bila dibandingkan dengan metode optimasi yang lainnya seperti PSO, PP-PSO, CP-PSO dan PP-PSO.

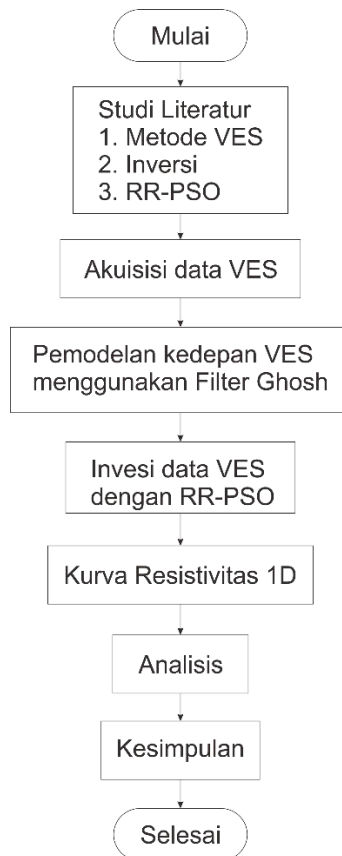
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Secara garis besar, alur penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini sebagaimana pada Gambar 3.1.



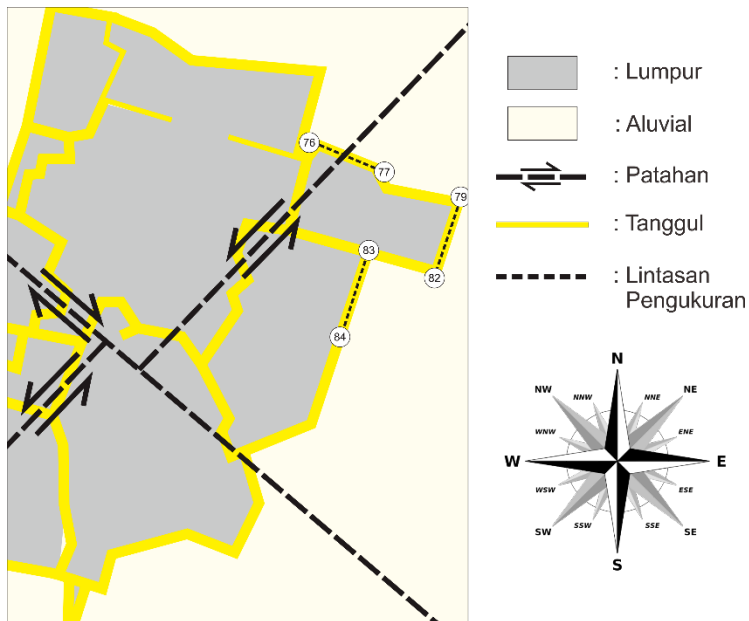
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

3.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memahami konsep dasar metode geolistrik *vertical electrical sounding* (VES) dan proses inversi pada data VES menggunakan algoritma RR-PSO. Studi literatur ini dilakukan pada beberapa jurnal internasional, buku, artikel dan Tugas Akhir terdahulu.

3.3 Akuisisi Data

Sebelum dilakukan pengambilan data lapangan, terlebih dahulu dilakukan perancangan lintasan pengambilan data. Dalam penelitian ini, lintasan yang diukur ialah lintasan atau tanggul yang rawan jebol, dalam artian tanggul tersebut sering jebol, yaitu pada titik P.76-P.77, P.79-P.82 dan P.83-P.84 seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Lintasan Pengukuran

Pada penelitian ini pengambilan data dilakukan menggunakan metode *Vertical Eletrical Sounding* (VES) dengan jarak minimum dan maksimum $AB/2$ masing – masing adalah 1,5 m dan 30 m. Sedangkan untuk jarak minimum dan maksimum $MN/2$ masing – masing adalah 0,5 m dan 10 m.

3.4 Pemodelan Ke Depan

Pemodelan ke depan dilakukan untuk mendapatkan model yang memiliki respon yang cocok dengan data lapangan atau data pengukuran, dengan membuat kurva resistivitas semu terhadap $AB/2$ dan input parameter berupa resistivitas (ρ) dan ketebalan lapisan (H). Dalam pemodelan ke depan dihasilkan data sintetik. Data sintetik tersebut kemudian dicocokkan sesuai dengan data lapangan, yaitu nilai resistivitas yang didapatkan selama pengukuran di tanggul LUSI. Data sintetik dimodelkan dengan metode inversi RR-PSO untuk proses validasi inversi. Pada penelitian ini proses pemodelan ke depan data VES dilakukan dengan menggunakan filter Ghosh, sebagaimana Persamaan (2.17).

3.5 Inversi Data Lapangan

Pada penelitian ini digunakan *software* inversi RR-PSO untuk inversi data VES berbasis MATLAB versi R2009a (Arung Laby, 2015). Hasil dari inversi ini merupakan resistivitas 1D atau tidak lain merupakan nilai dari setiap titik. Oleh karena itu, hasil inversi data lapangan tersebut kemudian dikombinasikan dengan data resistivitas 1D yang lainnya di setiap titik pada setiap satu lintasan sehingga menghasilkan data lapangan resistivitaas 2D. Selanjutnya hasil dari penampang resistivitas 2D tersebut dibandingkan dengan penampang resistivitas 2D hasil dari metode lainnya pada lintasan yang sama untuk mengetahui apakah hasil inversi menggunakan metode VES dengan proses inversi mnegggunakan algoritma RR-PSO dapat mengestimasi parameter bawah permukaan dengan akurat atau tidak.

3.6 Analisis

Setelah dilakukan pengolahan data lapangan melalui proses inversi menggunakan algoritma RR-PSO, pada tahap ini dilakukan analisis terhadap hasil yang diperoleh pada data lapangan tersebut. Hasil dari proses inversi tersebut kemudian diinterpretasikan menurut nilai resistivitas dan kedalaman lapisan, sehingga hasil plot nilai resistivitas dan kedalaman pada setiap titik dapat menggambarkan kondisi bawah permukaan. Analisis ini dilakukan untuk menjawab permasalahan pada penelitian ini serta memberikan rekomendasi terkait hasil keadaan bawah permukaan tanggul menggunakan algoritma RR-PSO.

3.7 Kesimpulan

Pada tahap ini seluruh hasil yang telah dianalisis dalam penelitian ini disimpulkan. Kesimpulan yang diperoleh diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya dan memperbaiki penelitian yang telah dilakukan.

BAB IV

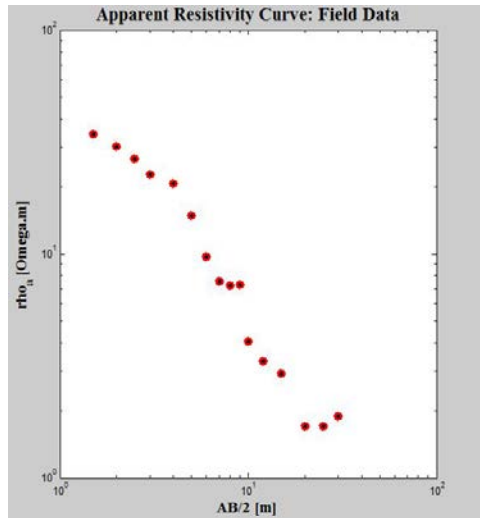
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan hasil penelitian yang telah dilakukan dalam menyelesaikan masalah yang telah dipaparkan sebelumnya berdasarkan data-data yang telah didapatkan. Hasil tersebut digunakan untuk mengidentifikasi bawah permukaan tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI) pada titik P.76-P.77, P.79-P.82 dan P.83-P.84. Data yang digunakan yaitu data *Vertical Electrical Sounding* (VES) dengan proses inversi mengimplementasikan algoritma *regresive-regresive Particle Swarm Optimization* (RR-PSO).

4.1 Hasil Akuisisi Data Lapangan

Pada penelitian ini, pengukuran data VES lapangan dilakukan di tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI) dengan jumlah lintasan yang diukur yaitu tiga lintasan. Ketiga lintasan tersebut dipilih karena ketiga lintasan tersebut terletak di sebelah timur dari pusat semburan, dimana sisi timur dari tanggul LUSI ini sering terjadi rembesan oleh air dari dalam tanggul. Adapun lintasan tersebut adalah titik P.76-P.77, P.79-P.82 dan P.83-P.84 dengan panjang lintasan masing-masing 305, 380 dan 370 meter. Metode pengukuran yang digunakan ialah metode *Vertical Electrical Sounding* (VES), dengan bentangan maksimum adalah 60 meter, dengan masing-masing lintasan didapatkan beberapa titik sesuai panjang lintasan tanggul.

Pada tanggul titik P.76-P.77 didapatkan 14 titik *sounding*, sedangkan untuk tanggul P.79-P.82 dan P.83-P.84 masing-masing didapatkan 17 titik *sounding*. Setiap titik *sounding* didapatkan 19 data sesuai bentangan maksimum AB. Hasil pengukuran berupa nilai resistivitas yang didapatkan dari hasil injeksi arus pada permukaan tanggul. Nilai resistivitas hasil pengukuran di lapangan ditampilkan dengan cara plot antara nilai resistivitas (ρ) yang terukur dengan jarak atau titik pengambilan data pada lintasan menggunakan perangkat lunak Matlab 2009a, dengan hasil pengukuran nilai resistivitas di lapangan sudah dikalikan dengan faktor geometri sesuai dengan konfigurasi yang digunakan, seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Data lapangan VES di salah satu titik pada tanggul P.76-P.77

Dari Gambar 4.1 menunjukkan bahwa setiap bertambahnya jarak antar elektroda maka nilai resistivitas yang didapatkan nilainya semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa nilai resistivitas “asli” bawah permukaan menurun dengan bertambahnya kedalaman. Namun pada gambar tersebut terlihat ada beberapa data yang nilai resistivitasnya sama dengan nilai resistivitas sebelumnya bahkan nilai resistivitasnya melebihi nilai resistivitas data sebelumnya. Hal ini membuktikan bahwa setiap pengambilan data pengukuran seringkali terkontaminasi *noise* (Grandis, 2009). Untuk itu perlu dilakukan proses optimasi dalam pengolahan data lapangan untuk meminimalisir hasil dari pemodelan yang dipengaruhi *noise*.

4.2 Inversi Data Lapangan VES Menggunakan RR-PSO

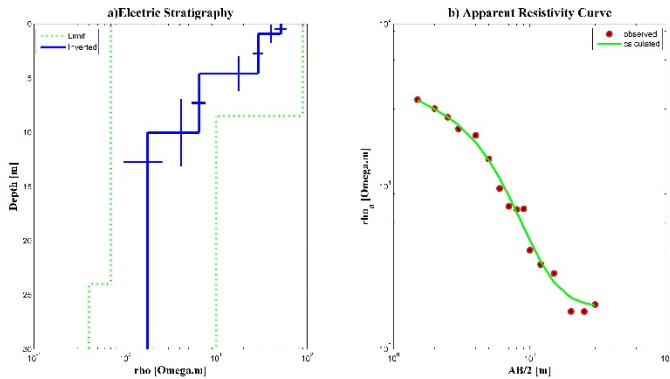
Pemodelan inversi dilakukan untuk mencari solusi model terbaik yang dapat menjelaskan keadaan geologi bawah permukaan berdasarkan data pengukuran dengan cara meminimumkan fungsi obyektif (*misfit*) atau sering dikatakan sebagai proses fitting (Menke, 1989).

Pada inversi data VES ini, dilakukan untuk menghasilkan parameter model bawah permukaan, yaitu resistivitas (ρ) dan ketebalan (H). Inversi dilakukan dengan menentukan *search space* parameter model terlebih dahulu. *Search space* untuk tebal lapisan didasarkan pada data SPT dan bor (Sungkono *et al.*, 2014) (sebagaimana Tabel 4.1) sedangkan untuk resistivitas didasarkan pada nilai resistivitas semu kurva VES.

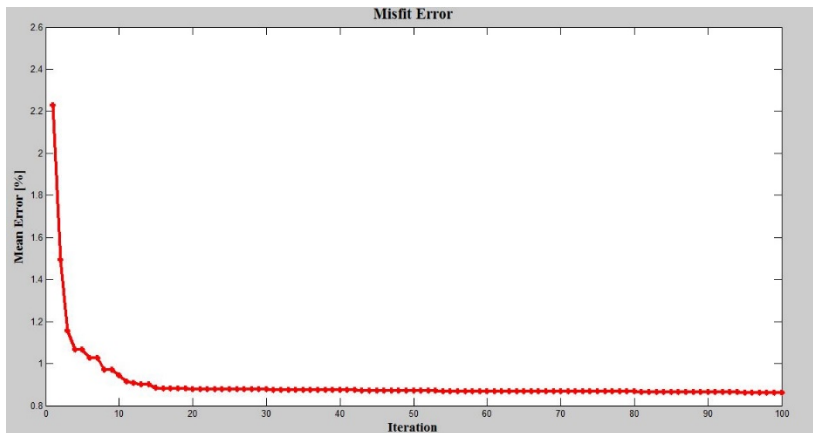
Proses inversi data VES dengan algoritma RR-PSO ini menggunakan 200 partikel dan 100 iterasi. Setelah dilakukan inversi pada data VES lapangan ini, diperoleh nilai dari resistivitas (ρ) dan ketebalan lapisan (H) dari hasil inversi. Hasil dari kedua parameter tersebut digambarkan dalam bentuk *Electric Stratigraphy* dan diperoleh pula kurva dari resistivitas semu antara data lapangan dan data pengamatan yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 beserta *error* yang diperoleh dari hasil inversi data VES.

Tabel 4.1 *Search space* pada inversi data VES lapangan

Lapisan Ke-	<i>Search space</i>	
	$H (m)$	$\rho (\Omega m)$
1	0.5 – 12	1 – 70
2	1 – 15	1 – 70
3	1 – 20	0.5 – 10
4	<i>half-space</i>	0.5 – 10



Gambar 4.2 Hasil inversi data lapangan di salah satu titik pada tanggul P.76-P.77: a) *Electric Stratigraphy*; b) Pencocokan kurva resistivitas semu pada data VES.



Gambar 4.3 *Misfit Error* sebagai fungsi iterasi pada proses inversi data VES

Gambar 4.2b untuk lintasan tanggul P.76-P.77 terlihat bahwa data perhitungan hasil inversi mendekati atau berhimpit dengan data pengukuran di lapangan, artinya nilai yang didapatkan dalam proses inversi tidak jauh berbeda dengan nilai pada data pengukuran di

lapangan. Melihat dari kurva resistivitas yang cukup *fit* antara data perhitungan dan data pengukuran, menunjukkan bahwa *error* yang dihasilkan akan semakin kecil. Sedangkan hasil *fitting* antara data perhitungan dengan data pengukuran yang tidak *fit* akan menunjukkan hasil *error* yang besar. Hasil *fit* atau tidaknya suatu data tersebut juga dapat dilihat melalui kurva *misfit error* pada fungsi iterasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.3, menunjukkan nilai hasil rata-rata *error* yang kecil yaitu 0.9%. Pada Gambar 4.3 kurva *misfit error* menunjukkan grafik *error* yang menurun tajam pada iterasi ke-3, hingga iterasi ke-14 nilai *error* yang dihasilkan terus menurun. Kemudian di iterasi selanjutnya nilai *error* yang dihasilkan terlihat mengalami penurunan tetapi dengan jumlah iterasi yang banyak, atau dapat dikatakan telah mencapai konvergensi. Hal ini sesuai dengan sifat atau karakteristik dari algoritma RR-PSO yang memiliki tingkat konvergensi paling tinggi jika dibandingkan dengan algoritma dari PSO yang sebelum-sebelumnya (Fernández-Martínez & García-Gonzalo, 2012), dengan melihat kurva *misfit error* di awal-awal iterasi sudah mengalami konvergensi.

Sementara kurva *Electric Stratigraphy* (Gambar 4.2a) menunjukkan nilai resistivitas semakin menurun seiring dengan bertambahnya kedalaman. Dengan melihat hasil dari nilai resistivitas pada *Electric Stratigraphy* sebenarnya sudah dapat dilihat kondisi bawah permukaan yang semakin dalam semakin rendah nilai resistivitasnya. Namun untuk menginterpretasikan kondisi bawah permukaan tanggul tidak cukup hanya dengan mengandalkan dari hasil tersebut saja, perlu adanya data pendukung lainnya untuk bisa saling melengkapi kekurangan hasil inversi atau ketiak-pastian solusi dari pemodelan geofisika. Data pendukung bisa berupa hasil dari proses inversi dengan metode optimasi yang berbeda maupun metode pengambilan data pengukuran yang berbeda, atau data SPT yang dipakai dalam penelitian ini contohnya dan kondisi litologi daerah tersebut. Dengan adanya data-data penunjang yang cukup dapat memudahkan dalam menginterpretasikan suatu model yang dalam penelitian ini merupakan model tanggul Lumpur Sidoarjo.

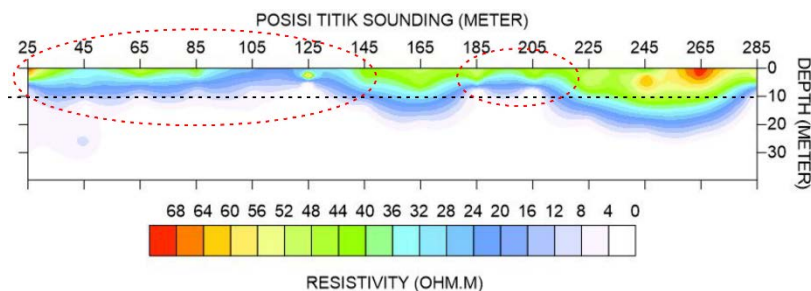
Tabel 4.2 Hasil inversi data lapangan VES di salah satu titik pengukuran pada tanggul P.76-P.77 menggunakan algoritma RR-PSO

Parameter Model	Hasil Inversi
$H_1 (m)$	0.9129
$H_2 (m)$	3.6629
$H_3 (m)$	5.4359
$\rho_1 (\Omega m)$	51.3615
$\rho_2 (\Omega m)$	28.9379
$\rho_3 (\Omega m)$	6.5272
$\rho_4 (\Omega m)$	1.7643

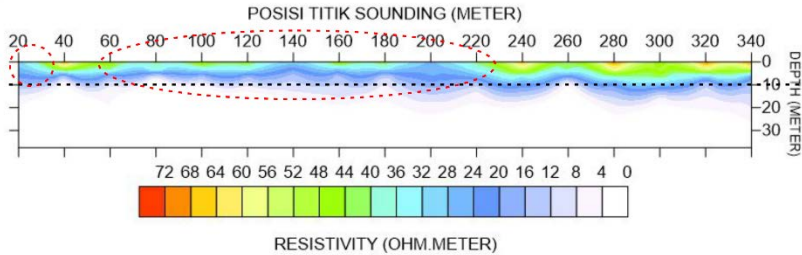
Pada Tabel 4.2 menunjukkan hasil inversi data lapangan VES di salah satu titik pengukuran pada tanggul P.76-P.77. Terlihat pada Gambar 4.2a, kurva *Electric Stratigraphy* mempunyai *range* pada setiap solusi tebakan parameter modelnya. *Range* tersebut merupakan ketidakpastian solusi model. Nilai yang ditunjukkan oleh Tabel 4.2 merupakan hasil dari Gambar 4.2a atau nilai parameter model. Nilai tersebut diambil berdasarkan nilai tengah dari solusi yang diberikan dari hasil inversi. Nilai parameter model yang dihasilkan merupakan *range* nilai *search space* yang telah ditentukan sebelumnya. Ketidakpastian solusi pada parameter model tersebut ditunjukkan juga melalui distribusi posterior. Distribusi posterior tersebut terkonsentrasi pada suatu nilai, nilai parameter tebakan dengan jumlah sampel yang banyak, dengan demikian proses inversi data VES lapangan ini dapat dikatakan stabil (Arung Laby, 2016).

4.3 Rekontruksi Tanggul dan Interpretasi Hasil Inversi Data VES

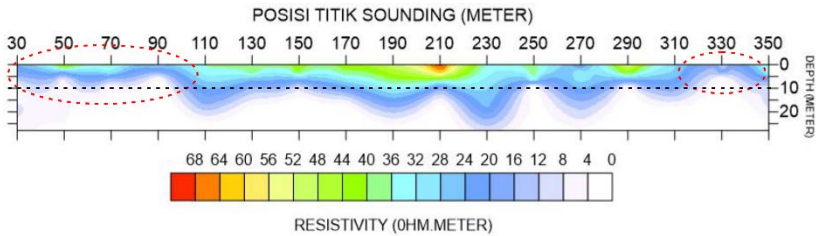
Setelah dilakukan proses inversi pada data lapangan VES maka diperoleh nilai dari resistivitas (ρ) dan ketebalan lapisan (H). Data yang diperoleh tersebut merupakan data dari setiap titik *sounding*, dengan masing-masing titik *sounding* tersebut dilakukan proses inversi menggunakan algoritma RR-PSO untuk memperoleh data di masing-masing titik pengukuran, atau dengan kata lain hasil data pada proses inversi ini merupakan bentuk model resistivitas satu dimensi (1D). Sehingga perlu dilakukan plot nilai resistivitas (ρ) dan ketebalan lapisan (H) pada setiap titik *sounding* agar diperoleh model quasi resistivitas dua dimensi (2D) atau rekonstruksi model resistivitas 2D. Untuk pengeplotan nilai resistivitas (ρ) dan ketebalan lapisan (H) dalam penelitian ini digunakan perangkat lunak Surfer 11. Dalam pembentukan quasi resistivitas 2D diperlukan nilai dari x , y dan z untuk dapat dihasilkan model 2D, yang dalam penelitian ini x merupakan posisi dari masing-masing titik sounding, y merupakan nilai dari ketebalan lapisan sedangkan nilai resistivitas sebagai z -nya. Hasil dari rekonstruksi model resistivitas 2D dapat dilihat pada Gambar 4.4-4.6.



Gambar 4.4 Hasil rekonstruksi model bawah permukaan tanggul LUSI P.76-P.77 berdasarkan data resistivitas quasi 2-D.



Gambar 4.5 Hasil rekonstruksi model bawah permukaan tanggul LUSI P.79-P.82 berdasarkan data resistivitas quasi 2-D.



Gambar 4.6 Hasil rekonstruksi model bawah permukaan tanggul LUSI P.83-P.84 berdasarkan data resistivitas quasi 2-D.

Untuk melakukan interpretasi suatu pemodelan dalam geofisika perlu adanya data pendukung seperti telah disebutkan sebelumnya, dalam penelitian ini data pendukung yang digunakan yaitu data nilai kisaran resistivitas (Tabel 4.2), hasil penelitian dengan metode yang berbeda dan juga data hasil pengukuran sebelumnya di tempat yang sama.

Tabel 4.3 Kisaran nilai resistivitas dari beberapa batuan dan mineral (Telford *et al.*, 1990)

Jenis Batuan/Tanah/Air	Tingkat Resistivitas (Ωm)
Lempung	1 – 100
Lanau	10 – 200
Batu Lumpur	3 – 70

Karsa	$10 - 2 \times 10^8$
Batu Pasir	50 – 500
Batu Kapur	100 – 500
Lava	$100 - 5 \times 10^4$
Air Tanah	0.5 – 300
Air Laut	0.2
Breksi	75 – 200
Andesit	100 – 200
Tufa Vulkanik	20 – 100
Konglomerat	$2 \times 10^3 - 10^4$

Tanggul P.76-P.77 merupakan bagian dari tanggul lapis pertama yang posisinya terletak paling dekat dengan semburan lumpur, karena bagian tanggul di sisi barat pada tanggul P.76-P.77 ini mulai terkontaminasi dengan lumpur yang terus meluber. Pada sisi barat tanggul ini sudah mengalami jebol dan untuk itu dibuatkan tanggul baru pada sisi utara tanggul yang jebol. Oleh karenanya pengukuran dilakukan pada tanggul P.76-P.77 seperti pada Gambar 4.4 ini untuk melihat kondisi kekinian dari tanggul tersebut. Pada tanggul ini juga beberapa kali dilakukan pengukuran yang menemukan adanya anomali yang kemungkinan anomali tersebut merupakan patahan Watu Kosek yang melintasi tanggul ini.

Hasil pada tanggul P.76-P.77 menunjukkan bahwa di beberapa titik pada tanggul mulai tersaturasi fluida. Hal ini bisa dilihat dari kondisi yang tanggul yang memiliki nilai resistivitas yang rendah. Pada Gambar 4.4 juga menunjukkan tanggul memiliki ketebalan sekitar 10 meter. Ketebalan lapisan yang ditunjukkan pada hasil ini sesuai dengan data yang ada dengan hasil uji SPT dan data bor yang sudah diuji sebelumnya dimana tanggul LUSI memiliki ketebalan sekitar 11-13 meter (Sungkono *et al.*, 2014). Namun ada titik dengan ketebalan lapisan tanggul ini mencapai 20 meter, dimungkinkan tanggul ini mengalami penurunan yaitu di sekitar titik 245-265 meter dari titik nol pengukuran. Apabila dilihat dari hasil nilai resistivitas yang diperoleh, pada bagian bawah tanggul terlihat mulai tersaturasi

air. Sementara pada titik antara 40 dan 135 meter mempunyai nilai resistivitas yang lebih rendah bila dibandingkan dengan nilai resistivitas pada bagian tanggul yang lain, hal ini memungkinkan pada titik tersebut bagian bawah tanggul yang tersaturasi air lebih banyak dan memungkinkan tanggul ambles jika tidak segera diberikan penanganan yang tepat. Tanggul yang tersaturasi fluida dapat disebabkan oleh retakan ataupun fluida yang mengalir melalui pori-pori batuan. Pada tanggul tersebut dimungkinkan saturasi fluida terjadi akibat retakan dikarenakan pada titik tersebut kemungkinan dilewati patahan Watu Kosek dan rembesan fluida melalui pori-pori batuan.

Jika dibandingkan dengan tanggul yang lain, tanggul P.79-P.82 merupakan tanggul dengan elevasi terendah dan mengalami penurunan tanah terbesar (Husein *et al.*, 2015). Perlu diketahui bahwa tanggul ini merupakan tanggul dengan letak paling timur, seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa tanggul-tanggul pada sisi timur mengalami banyak tekanan dari luapan lumpur dan memungkinkan banyak mengalami penurunan kualitas tanggul (runtuh) tersebut dengan tersaturasinya tanggul oleh lumpur atau rembesan air (Sungkono *et al.*, 2014) maupun penurunan permukaan tanggul.

Ditunjukkan hasil penampang quasi resistivitas 2D pada tanggul LUSI P.79-P.82 seperti pada Gambar 4.5. Tidak seperti pada tanggul P.76-P.77, pada tanggul ini terlihat permukaan tanggul yang memiliki nilai resistivitas yang rendah. Hal ini dimungkinkan karena pada tanggul ini, seperti yang telah dilakukan penelitian sebelumnya oleh Husein *et al.*, (2015), mengalami penurunan tanah dan tersaturasi air. Sehingga dapat dilihat keadaan tanggul yang seharusnya mempunyai ketebalan antara 11-13 meter, namun sebelum kedalaman tersebut tanggul mempunyai nilai resistivitas yang lebih rendah, terutama pada titik antara 20 sampai 210 meter. Dapat dimungkinkan tanggul ini rawan jebol dikarenakan fluida yang mulai mensaturasi bagian permukaan tanggul hampir di sepanjang tanggul ini. Hal ini dapat disebabkan karena fluida mengalir pada pori-pori batuan. Untuk bagian tanggul yang lain

terlihat relatif stabil. Namun untuk saat ini, bagian tanggul pada sisi ini sudah mengalami pembenahan dengan dibuatnya tanggul baru di sisi luar bagian tanggul.

Tanggul titik P.83-P.84 ini merupakan tanggul dengan lintasan terpanjang di sisi timur dari pusat semburan. Pada awalnya tanggul ini terbagi menjadi beberapa lintasan, akan tetapi karena kurang kuat dalam menahan semburan lumpur yang terus bertambah tanggul pada sisi ini beberapa sudah jebol dan menjadi satu lintasan lurus seperti pada saat ini (lihat Gambar 3.2). Oleh karena itu dalam penelitian ini dipilih salah satu lintasan ini karena faktor tanggul yang sudah pernah jebol sekaligus untuk melihat kondisi tanggul pada saat ini. Namun lintasan dengan panjang mencapai 1 km ini hanya diambil ± 385 meter pada sisi bagian utara dikarenakan sisi tersebut yang masih rawan mengalami jebol (Husein *et al.*, 2015). Untuk hasil pengukuran di lintasan ini setelah dilakukan pengolahan data dapat dilihat pada Gambar 4.6.

Dari Gambar 4.6 ditunjukkan hasil bahwa tanggul LUSI P.83-P.84 juga mulai tersaturasi fluida pada titik-titik tertentu. Dari titik 0 sampai 10 meter terlihat batas dari tanggul tersebut, namun ada beberapa titik yang mempunyai nilai resistivitas rendah pada batas tersebut. Seperti yang terlihat pada titik 30-90 meter dan 310-335 meter dari titik nol pengukuran. Pada dua titik tersebut nampak tanggul yang kemungkinan terbaik mulai tersaturasi air, oleh karenanya material tanggul yang berupa batu-batu, kerikil dan batuan pasir (Husein *et al.*, 2015), yang seharusnya memiliki nilai resistivitas dengan *range* antara 10 – 10000 Ωm menjadi lebih rendah nilai resistivitasnya. Kemungkinan pada tanggul ini saturasi fluida yang terjadi akibat rembesan air lumpur yang masuk melalui pori-pori batuan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

Lampiran 1

- Source Code: Forward Modeling VES

```
clc;
clear all;
close all;

% Define model
%using model from Cominna et al.(2003)
%Model 1
res = [250 120 90 60]; % Enter the resistivity
values for the three layers
thk = [3 5 4]; % Enter the thickness of
each layer

%Model 2
res2 = [100 120 60 160]; % Enter the
resistivity values for the three layers
thk2 = [2 3 2]; % Enter the thickness
of each layer

%Calculate apparent resistivity
global ab
ab= [1.5 2 2.5 3 4 5 6 6 7 8 9 10 12 15 15 20 25
30 30 ].*2; n= length(ab./2);
rhoa = dcfwdf(res,thk);
rhoa2= dcfwdf(res2,thk2);

rhoan_5= (ones(n,1)+0.05*randn(n,1)).*rhoa;
rhoan2_5= (ones(n,1)+0.05*randn(n,1)).*rhoa2;

rhoan_10=(ones(n,1)+0.1*randn(n,1)).*rhoa;
rhoan2_10= (ones(n,1)+0.1*randn(n,1)).*rhoa2;

% Ploting apparant resistivity curves without
noise
figure
subplot(2,1,1)
```

```

loglog(ab./2,rhoa, '-*');

hold on;
subplot(2,1,1)
loglog(ab./2,rhoa2, 'r-*');
hold on

Title('Resistivity Curve')
xlabel('AB/2 (m)')
ylabel ('apparent resistivity (ohm.m)')
xlim([1 30])
ylim([10^1 10^4])
legend('Model 1' , 'Model 2')

%ploting apparant resistivity curves with 3%
noise
figure
subplot(2,1,1)
loglog(ab./2,rhoan_5, '-*');

hold on;
subplot(2,1,1)
loglog(ab./2,rhoan2_5, 'r-*');

Title('Resistivity Curve')
xlabel('AB/2 (m)')
ylabel ('apparent resistivity (ohm.m)')
xlim([1 30])
ylim([10^1 10^4])
legend('Model 1' , 'Model 2')

figure
subplot(2,1,1)
loglog(ab./2,rhoan_10, '-*');

hold on;
subplot(2,1,1)
loglog(ab./2,rhoan2_10, 'r-*');

Title('Resistivity Curve')

```

```

xlabel('AB/2 (m)')
ylabel('apparent resistivity (ohm.m)')
xlim([1 30])
ylim([10^1 10^4])
legend('Model 1' , 'Model 2')

m1= [(ab./2)' rhoa rhoan_5 rhoan_10];
xlswrite('model 01.xls' ,m1);
m2= [(ab./2)' rhoa2 rhoan2_5 rhoan2_10];
xlswrite('model 02.xls' ,m2);

```

Lampiran 2

- Source Code: Inversi RR-PSO VES

```

%RR-PSO algorithm to invert VES DATA
clc; close all; clear all;
input=xlsread('model 01.xls',1);
global ab rhoa_ob Xmin Xmax npart m tol
tol=12;
ab=input(:,1)*2; rhoa_ob= input(:,2);
npart=200; maxGen=100;

%inisiasi awal
hmin= [1.5 2.5 2];
hmax= [4.5 7.5 6];
rho_min=[125 60 45 30];
rho_max=[375 180 135 120];
Xmin=[hmin rho_min];
Xmax=[hmax rho_max];
cp=1/3*6.97;
w=3.9; dt=1;
cg=1/6*6.97;
MaxM=1;

m=numel(hmin);
nvars=numel(Xmin);
Y=zeros(npart,1); X=individu;
for ii=1:MaxM
    pos=[];

```

```

V=zeros(size(X));
rhoa_cal=thickres(X);
Y=objfunc(rhoa_cal)';
Ybest=Y;
Xbest=X;
indices=Y<tol;
if ~isempty(indices)
    pos=[Xbest(indices,:) Y(indices,1)];
end
me(1,ii)=mean(Y);
iqry(1,ii)=iqr(Y);
[GYbest, indexgbest]=min(Y);
gbest= indexgbest(1);
solution(1,:)= Xbest(gbest,:);
errorbest(1,ii)=GYbest;
disp 'inisialisasine wes mari reekkk..'
fprintf('iterasi=%i Min Error=%.2f Individu
Ke--=%.2f \n',1,GYbest,gbest)
a=clock;c=cp+cg;
for iter = 1:maxGen
    % Calculating PSO parameters
    %w=wmax-(wmax-wmin)*(iter+1)/maxGen;
    %w = linrate(wf,wi,maxGen, 0, iter);
    % For later calculations only
    GXbest = repmat(Xbest(gbest,:),npart, 1);
    % Calculating speeds
    V =(V + dt*cp*rand(size(V)).*(Xbest-X)
+dt*cg*rand(size(V)).*(GXbest-X))./(1+(1-
w)*dt+c*dt^2);
    %Population is moving
    X = X + V*dt;
    % boundary X
    [V,X]=syaratX(V,Xbest,X,Xmin,Xmax);
    rhoa_cal=thickres(X);
    Y=objfunc(rhoa_cal);
    % search for optimum local
    [Xb,Yb,posa]=optimumlocal(Xbest,X,Ybest,Y);
    Xbest=Xb;
    Ybest=Yb;

```



```

indices=find(posa);
if ~isempty(indices)
    pos1=[Xb(indices,:) Yb(indices,1)];
    pos=[pos;pos1];
else
    pos=pos;
end
me(iter+1,ii)=mean(Yb);
iqry(iter+1,ii)=iqr(Yb);
% search for optimum global
[GYbest,indexgbest]=min(Ybest);
gbest=indexgbest(1);
solution(iter+1,:)=Xbest(gbest,:);
errorbest(iter+1,ii)=GYbest;
fprintf('Iterasion=%i Min Error=%.2f
Individu Ke--=%.2f \n',iter+1,GYbest,gbest)
end

end

```

Lampiran 3

- Field Data: Tanggul LUSI P.76-P.77

X(Position)	Y(h)	Z(rho)
25	0	69,99896969
25	1,931708257	69,99896969
25	1,931708257	8,94867297
25	6,543698209	8,94867297
25	6,543698209	6,395496
25	20,27272314	6,395496
25	20,27272314	10
25	60,27272314	10
45	0	33,15557169
45	4,644986874	33,15557169
45	4,644986874	3,017194498
45	12,40871563	3,017194498
45	12,40871563	9,999796348

45	26,00323192	9,999796348
45	26,00323192	2,575241556
45	66,00323192	2,575241556
65	0	51,3615163
65	0,912924008	51,3615163
65	0,912924008	28,93794133
65	4,575799281	28,93794133
65	4,575799281	6,527173299
65	10,01169778	6,527173299
65	10,01169778	1,764302131
65	50,01169778	1,764302131
85	0	40,97416383
85	2,606770101	40,97416383
85	2,606770101	12,07079663
85	6,359302387	12,07079663
85	6,359302387	9,696996974
85	8,810001747	9,696996974
85	8,810001747	1,070496448
85	48,81000175	1,070496448
105	0	24,07062975
105	2,52716602	24,07062975
105	2,52716602	7,609308337
105	7,213261018	7,609308337
105	7,213261018	4,465045728
105	15,5097592	4,465045728
105	15,5097592	1,23822658
105	55,5097592	1,23822658
125	0	19,38099839
125	0,709853185	19,38099839
125	0,709853185	69,96720186

125	2,722572876	69,96720186
125	2,722572876	1,573427574
125	4,777875656	1,573427574
125	4,777875656	10
125	44,77787566	10
145	0	41,33803393
145	3,951504239	41,33803393
145	3,951504239	5,577924457
145	13,68525802	5,577924457
145	13,68525802	2,701555296
145	16,63272726	2,701555296
145	16,63272726	1,195736415
145	56,63272726	1,195736415
165	0	47,93294113
165	4,800822148	47,93294113
165	4,800822148	4,91799116
165	19,79118482	4,91799116
165	19,79118482	0,5
165	39,79118482	0,5
165	39,79118482	3,855643159
165	79,79118482	3,855643159
185	0	49,35752684
185	4,998488834	49,35752684
185	4,998488834	1,0006927
185	6,019488912	1,0006927
185	6,019488912	4,099884197
185	13,90929665	4,099884197
185	13,90929665	3,685094772
185	53,90929665	3,685094772
205	0	44,45499373

205	5,096795137	44,45499373
205	5,096795137	1,005711663
205	6,312839254	1,005711663
205	6,312839254	4,901861363
205	25,61426064	4,901861363
205	25,61426064	0,501343339
205	65,61426064	0,501343339
225	0	45,29726463
225	1,405641691	45,29726463
225	1,405641691	56,51049605
225	3,899774027	56,51049605
225	3,899774027	5,421982122
225	18,81591116	5,421982122
225	18,81591116	0,692833869
225	58,81591116	0,692833869
245	0	32,14080169
245	0,746208554	32,14080169
245	0,746208554	69,99904744
245	3,042437884	69,99904744
245	3,042437884	6,298814751
245	23,04243788	6,298814751
245	23,04243788	2,17385604
245	63,04243788	2,17385604
265	0	70
265	0,5	70
265	0,5	70
265	2,668626683	70
265	2,668626683	8,351131262
265	22,66862668	8,351131262
265	22,66862668	0,691355104

265	62,66862668	0,691355104
285	0	51,29557081
285	2,028770187	51,29557081
285	2,028770187	58,30847111
285	3,19379139	58,30847111
285	3,19379139	3,227490387
285	8,886953323	3,227490387
285	8,886953323	3,413147522
285	48,88695332	3,413147522

Lampiran 4

- Field Data: Tanggul LUSI P.79-P.82

X (titik sounding)	Y (h)	Z (rhoa)
20	0	29,15513206
20	2,048352193	29,15513206
20	2,048352193	11,99073433
20	11,27632204	11,99073433
20	11,27632204	0,500000318
20	23,21890984	0,500000318
20	23,21890984	2,083360438
20	63,21890984	2,083360438
40	0	70
40	1,005468464	70
40	1,005468464	23,43940389
40	5,700346251	23,43940389
40	5,700346251	7,653031544
40	6,73161335	7,653031544
40	6,73161335	1,743178419
40	46,73161335	1,743178419
60	0	46,21218859
60	3,035247549	46,21218859

60	3,035247549	11,25026792
60	6,928731516	11,25026792
60	6,928731516	4,158655894
60	19,5143125	4,158655894
60	19,5143125	1,178766037
60	59,5143125	1,178766037
80	0	39,4028853
80	4,703190473	39,4028853
80	4,703190473	10,92596091
80	5,705400606	10,92596091
80	5,705400606	0,7116024
80	6,900004609	0,7116024
80	6,900004609	1,876074714
80	46,90000461	1,876074714
100	0	52,13898853
100	1,0287765	52,13898853
100	1,0287765	20,51339453
100	4,734495219	20,51339453
100	4,734495219	6,126805169
100	9,895242555	6,126805169
100	9,895242555	1,950074658
100	49,89524256	1,950074658
120	0	44,94639266
120	1,52143604	44,94639266
120	1,52143604	15,64094998
120	6,490274618	15,64094998
120	6,490274618	1,845541917
120	14,31676795	1,845541917
120	14,31676795	5,106334241
120	54,31676795	5,106334241

140	0	30,24204966
140	2,282333444	30,24204966
140	2,282333444	17,27113111
140	3,532412249	17,27113111
140	3,532412249	6,531275573
140	14,68555386	6,531275573
140	14,68555386	1,362945902
140	54,68555386	1,362945902
160	0	50,25304611
160	1,803263442	50,25304611
160	1,803263442	17,23946851
160	3,77014132	17,23946851
160	3,77014132	9,219832226
160	14,95061603	9,219832226
160	14,95061603	1,294546426
160	54,95061603	1,294546426
180	0	43,90042803
180	2,053683002	43,90042803
180	2,053683002	10,130446
180	5,865628451	10,130446
180	5,865628451	5,474010167
180	15,38256173	5,474010167
180	15,38256173	7,696220063
180	55,38256173	7,696220063
200	0	25,99124041
200	5,064037285	25,99124041
200	5,064037285	5,553528804
200	20,06403722	5,553528804
200	20,06403722	0,667143174
200	37,51449628	0,667143174

200	37,51449628	6,032813543
200	77,51449628	6,032813543
220	0	41,03096324
220	1,147483206	41,03096324
220	1,147483206	26,05251145
220	6,445925302	26,05251145
220	6,445925302	9,992821409
220	10,85335422	9,992821409
220	10,85335422	3,109817999
220	50,85335422	3,109817999
240	0	66,78425083
240	1,307174952	66,78425083
240	1,307174952	33,45718445
240	6,215974798	33,45718445
240	6,215974798	8,835826523
240	16,54534556	8,835826523
240	16,54534556	1,803336985
240	56,54534556	1,803336985
260	0	42,84139214
260	3,040600225	42,84139214
260	3,040600225	33,76581415
260	4,533308329	33,76581415
260	4,533308329	5,001007571
260	8,940880943	5,001007571
260	8,940880943	9,999996034
260	48,94088094	9,999996034
280	0	69,99999451
280	1,524220636	69,99999451
280	1,524220636	23,24956613
280	8,927121323	23,24956613

280	8,927121323	3,230616643
280	24,40639989	3,230616643
280	24,40639989	3,216452958
280	64,40639989	3,216452958
300	0	43,66296492
300	2,244324272	43,66296492
300	2,244324272	54,58369914
300	3,333457881	54,58369914
300	3,333457881	7,331292171
300	15,27452287	7,331292171
300	15,27452287	1,361100124
300	55,27452287	1,361100124
320	0	69,99994761
320	1,766123523	69,99994761
320	1,766123523	16,15346589
320	7,992103062	16,15346589
320	7,992103062	1,898345732
320	27,99210306	1,898345732
320	27,99210306	6,058769274
320	67,99210306	6,058769274
340	0	69,99966863
340	1,669614864	69,99966863
340	1,669614864	18,31994103
340	6,979326468	18,31994103
340	6,979326468	6,40759533
340	22,93647219	6,40759533
340	22,93647219	1,79242512
340	62,93647219	1,79242512

Lampiran 5

- Field Data: Tanggul LUSI P.83-P.84

X (titik sounding)	Y (h)	Z (rhoa)
30	0	24,05580294
30	1,814356081	24,05580294
30	1,814356081	4,202911365
30	10,12958219	4,202911365
30	10,12958219	9,831578168
30	19,24197235	9,831578168
30	19,24197235	0,500005627
30	59,24197235	0,500005627
50	0	49,08555306
50	1,725465747	49,08555306
50	1,725465747	8,788628612
50	3,839919308	8,788628612
50	3,839919308	4,752262471
50	23,7602058	4,752262471
50	23,7602058	1,974539009
50	63,7602058	1,974539009
70	0	36,38423025
70	2,276898411	36,38423025
70	2,276898411	4,538104056
70	8,137189826	4,538104056
70	8,137189826	3,351629407
70	18,59257847	3,351629407
70	18,59257847	1,16606028
70	58,59257847	1,16606028
90	0	29,92183136
90	1,210613127	29,92183136
90	1,210613127	16,02539931
90	3,322783256	16,02539931

90	3,322783256	1,928850605
90	5,78562407	1,928850605
90	5,78562407	9,999996075
90	45,78562407	9,999996075
110	0	35,93067132
110	1,846044139	35,93067132
110	1,846044139	16,86456822
110	16,84604414	16,86456822
110	16,84604414	1,577534909
110	25,704954	1,577534909
110	25,704954	1,576446435
110	65,704954	1,576446435
130	0	39,93694744
130	2,854132396	39,93694744
130	2,854132396	18,71786545
130	7,835068072	18,71786545
130	7,835068072	2,093936773
130	18,7299258	2,093936773
130	18,7299258	4,644143592
130	58,7299258	4,644143592
150	0	40,98565247
150	3,307209077	40,98565247
150	3,307209077	11,68215433
150	8,459376561	11,68215433
150	8,459376561	0,520204791
150	16,52582029	0,520204791
150	16,52582029	9,999369729
150	56,52582029	9,999369729
170	0	41,45719475
170	2,621524505	41,45719475

170	2,621524505	31,80850767
170	5,767892922	31,80850767
170	5,767892922	1,654031122
170	17,45555956	1,654031122
170	17,45555956	9,990905055
170	57,45555956	9,990905055
190	0	49,33596999
190	1,28755398	49,33596999
190	1,28755398	24,38874295
190	14,12818121	24,38874295
190	14,12818121	1,454700958
190	27,88219694	1,454700958
190	27,88219694	9,9954527
190	67,88219694	9,9954527
210	0	69,99999874
210	2,329684236	69,99999874
210	2,329684236	19,9895476
210	8,695130258	19,9895476
210	8,695130258	2,299934765
210	16,58591738	2,299934765
210	16,58591738	10
210	56,58591738	10
230	0	33,84382604
230	2,72199657	33,84382604
230	2,72199657	25,48544988
230	17,72199657	25,48544988
230	17,72199657	10
230	27,58616419	10
230	27,58616419	0,5
230	67,58616419	0,5

250	0	36,8149138
250	1,572061871	36,8149138
250	1,572061871	38,72153043
250	5,967757755	38,72153043
250	5,967757755	0,690583097
250	8,733380058	0,690583097
250	8,733380058	2,04056856
250	48,73338006	2,04056856
270	0	16,73555986
270	0,5	16,73555986
270	0,5	35,08233049
270	3,386502442	35,08233049
270	3,386502442	9,989847105
270	21,6873394	9,989847105
270	21,6873394	0,5
270	61,6873394	0,5
290	0	52,54307605
290	1,283360491	52,54307605
290	1,283360491	28,77548292
290	6,159428057	28,77548292
290	6,159428057	4,131003033
290	7,730684959	4,131003033
290	7,730684959	1,929286937
290	47,73068496	1,929286937
310	0	28,11200435
310	2,889180475	28,11200435
310	2,889180475	16,19808627
310	11,33714588	16,19808627
310	11,33714588	0,876850154
310	20,06309314	0,876850154

310	20,06309314	9,997604782
310	60,06309314	9,997604782
330	0	10,77301927
330	0,547869373	10,77301927
330	0,547869373	47,55131538
330	2,386129488	47,55131538
330	2,386129488	2,150584815
330	3,418199412	2,150584815
330	3,418199412	9,99999998
330	43,41819941	9,99999998
350	0	36,13917443
350	2,526240173	36,13917443
350	2,526240173	8,814525536
350	9,034947965	8,814525536
350	9,034947965	10
350	16,06639415	10
350	16,06639415	9,999615983
350	56,06639415	9,999615983

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa data dan pembahasan yang telah dipaparkan sebagaimana bab sebelumnya, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagaimana berikut:

1. Tanggul P.76-P.77 ini terdapat beberapa titik yang tersaturasi air, yaitu pada posisi antara 90 – 135 meter.
2. Tanggul P.79-P.82 terdapat saturasi fluida dari posisi antara 0 sampai 210 meter.
3. Tanggul P.83-P.84 terdapat saturasi fluida pada posisi 90 meter dan 330 meter.

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian ini, diperoleh beberapa hal yang dapat menjadi pertimbangan untuk penelitian selanjutnya, yakni: perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pada tanggul-tanggul tersebut dengan metode yang sama atau metode yang berbeda sehingga dapat dibandingkan hasilnya dan segera ditindak lanjuti secara tepat pada titik-titik yang rawan mengalami runtuh atau jebol serta pengimplementasian algoritma RR-PSO pada permasalahan inversi geofisika lainnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Brunsdon, D. and Prior, D.B. (1984) 'Slope Instability' John Wiley and Sons
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., & Bell, G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams*. CRC Press.
- Fernández Martínez, J. L., and E. García Gonzalo. "The Generalized PSO: A New Door to PSO Evolution." *Journal of Artificial Evolution and Applications* 2008 (2008): 1–15. doi:10.1155/2008/861275.
- Fernández Martínez, J. L., and E. García Gonzalo. "The PSO Family: Deduction, Stochastic Analysis and Comparison." *Swarm Intelligence* 3, no. 4 (December 2009): 245–73. doi:10.1007/s11721-009-0034-8.
- Fernández-Martínez, J.L., E. García-Gonzalo, and J.P. Fernández-Alvarez. "Theoretical Analysis of Particle Swarm Trajectories through a Mechanical Analogy." *International Journal of Computational Intelligence Research* 4, no. 2 (2008). doi:10.5019/j.ijcir.2008.129.
- Fernández Martínez, Juan L., Esperanza García Gonzalo, José P. Fernández Álvarez, Heidi A. Kuzma, and César O. Menéndez Pérez. "PSO: A Powerful Algorithm to Solve Geophysical Inverse Problems." *Journal of Applied Geophysics* 71, no. 1 (May 2010): 13–25. doi:10.1016/j.jappgeo.2010.02.001.
- Fernández-Martínez, Juan Luis, and Esperanza García-Gonzalo. "Stochastic Stability and Numerical Analysis of Two Novel Algorithms of The PSO Family: PP-GPSO and RR-GPSO." *International Journal on Artificial Intelligence Tools* 21, no. 03

- (June 2012): 1240011.
doi:10.1142/S0218213012400118.
- Ghosh, D. P. "The Application of Linear Filter Theory to the Direct Interpretation of Geoelectrical Resistivity Sounding Measurements*." *Geophysical Prospecting* 19, no. 2 (1971): 192–217.
- Grandis, H., 2009. Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI), Jakarta.
- Husain, Salahuddin., 2012. Deformasi dan Pegunungan. Jurusan Teknik Geologi Fakultas Teknik UGM, Jogja.
- Husein, A., Santosa, B.J., Bahri, A.S., 2015. Seepage Monitoring of an Embankment Dam Using Resistivity Method: A Case Study of LUSI Mud Volcano P.79 - P.82 Embankment. *Appl. Mech. Mater.* 771, 213–217.
doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.771.213
- Janvier Domra Kana, Noël Djongyang. "Vertical Electrical Soundings for Subsurface Layers and Groundwater Investigations in the Mayo Kani Area in Cameroon." *International Journal of Science and Research (IJSR)* 4, no. 2 (2015): 396–401.
- Kennedy, J., and Eberhart R. C. "Particle Swarm Optimization. In Proceed-Ing's of The 1995 IEEE International Conference on Natural Networks." *IEEE Service, Piscataway*, 1995.
- Koefoed, O. *Geosounding Principles: Resistivity Sounding Measurements*. Methods in Geochemistry and Geophysics. Elsevier Science Ltd, 1980.
- Laby, D.A., 2016. Implementasi Algoritma RR-PSO yang Cepat, Stabil dan Robust Untuk Inversi Dispersi

- Gelombang Rayleigh dan Vertical Electrical Sounding. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- M. I. T., Taib. “Eksplorasi Geolistrik: Diktat Kuliah Metode Geolistrik.” Fakultas Ilmu Kebumian dan Teknologi Geofisika, Institut Teknologi Bandung, 1999.
- Menke, W., 1989. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press.
- Reynolds, John M. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. 2nd ed. Chichester, West Sussex; Malden, Mass: Wiley-Blackwell, 2011.
- Santosa, Budi. “Tutorial Particle Swarm Optimization.” *Teknik Industri, ITS*, 2006.
- Schön, Jürgen. *Physical Properties of Rocks: A Workbook*. Handbook of Petroleum Exploration and Production 8. Amsterdam; Boston: Elsevier, 2011.
- Sen, Mrinal K., and Paul L. Stoffa. *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*. Second edition. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2013.
- Sungkono, Husein, A., Prasetyo, H., Bahri, A.S., Monteiro Santos, F.A., Santosa, B.J., 2014. The VLF-EM imaging of potential collapse on the LUSI embankment. *J. Appl. Geophys.* 109, 218–232. doi:10.1016/j.jappgeo.2014.08.004
- Telford, W. M., L. P. Geldart, and R. E. Sheriff. “Applied Geophysics Second Edition.” Cambridge University Press, 1990.

Van Nostrand, R.G. and Cook, K.L. (1966) *Interpretation of resistivity data*. US Geological Survey Professional Paper No. 499.



POFIL PENULIS

Nanang Firdaus atau yang akrab disapa Nanang dilahirkan di Gresik pada tanggal 6 April 1993. Penulis lahir sebagai putra ketiga dari empat bersaudara buah pernikahan dari Bapak Hasan Abdullah dan Ibu Nurush Shobah. Penulis memulai perjuangannya dalam menuntut ilmu di TK Aisyiyah Bustanul Atfal Ujungpangkah pada tahun 1998-1999.

Kemudian Ia melanjutkan perjuangannya tersebut di kompleks yang sama yaitu di MI Muhammadiyah 1 Ujungpangkah Gresik (1999-2005), dan MTs Muhammadiyah 3 (2005-2008). Kemudian Penulis melanjutkan masa belajarnya di MA Al-Ishlah Paciran Lamongan (2008-2011). Pada tahun 2011 Penulis berkesempatan melanjutkan pendidikannya di Jurusan Fisika FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama pendidikannya Penulis memilih untuk mengambil bidang minat Fisika Bumi. Selama perkuliahan di ITS, Penulis juga disibukkan dengan kegiatan di luar kuliah. Penulis aktif di organisasi mahasiswa jurusan dan beberapa kepanitiaan. Pada tahun 2012-2013 Penulis aktif di HIMASIKA ITS sebagai staff departemen Pengembang Sumber Daya Mahasiswa (PSDM) HIMASIKA ITS. Di samping itu Penulis juga aktif sebagai asisten praktikum Geofisika di AAPG ITS-SC dan beberapa penelitian. Penulis juga pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo dengan tujuan untuk memonitoring ketahanan tanggul. Apabila ingin berdiskusi lanjut dengan Penulis, dapat menghubunginya via email dengan alamat na.fir48@gmail.com.